

ENERGIA SOLAR

ESTIMATIVA E PREVISÃO DE POTENCIAL SOLAR

Catálogo na Fonte
Elaborado por: Josefina A. S. Guedes
Bibliotecária CRB 9/870

M386e
2019 Martins, Fernando Ramos
Energia solar: estimativa e previsão de potencial solar / Fernando Ramos Martins,
Enio Bueno Pereira. - 1. ed. - Curitiba: Appris, 2019.
141 p. ; 21 cm (Sustentabilidade, impacto, direito, gestão e educação ambiental)

Inclui bibliografias
ISBN 978-85-473-2708-8

1. Energia solar. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Sustentabilidade.
I. Pereira, Enio Bueno. II. Título. III. Série.

CDD – 621.4

Livro de acordo com a normalização técnica da ABNT

Editora e Livraria Appris Ltda.
Av. Manoel Ribas, 2265 – Mercês
Curitiba/PR – CEP: 80810-002
Tel: (41) 3156 - 4731
www.editoraappris.com.br

The logo for Appris Editora, featuring the word "Appris" in a large, stylized, handwritten-style font, with the word "editora" in a smaller, simpler font directly beneath it.

Printed in Brazil
Impresso no Brasil

Fernando Ramos Martins
Enio Bueno Pereira

ENERGIA SOLAR
ESTIMATIVA E PREVISÃO DE POTENCIAL SOLAR

Appris
editora

Editora Appris Ltda.

1.^a Edição - Copyright© 2019 dos autores

Direitos de Edição Reservados à Editora Appris Ltda.

Nenhuma parte desta obra poderá ser utilizada indevidamente, sem estar de acordo com a Lei nº 9.610/98. Se incorreções forem encontradas, serão de exclusiva responsabilidade de seus organizadores. Foi realizado o Depósito Legal na Fundação Biblioteca Nacional, de acordo com as Leis nos 10.994, de 14/12/2004, e 12.192, de 14/01/2010.

FICHA TÉCNICA

EDITORIAL	Augusto V. de A. Coelho Marli Caetano Sara C. de Andrade Coelho
COMITÊ EDITORIAL	Andréa Barbosa Gouveia - UFPR Edmeire C. Pereira - UFPR Ireneide da Silva - UFC Jacques de Lima Ferreira - UP Marilda Aparecida Behrens - PUCPR
ASSESSORIA EDITORIAL	Alana Cabral
REVISÃO	Cristiana Leal Januário
PRODUÇÃO EDITORIAL	Fernando Nishijima
ASSISTÊNCIA DE EDIÇÃO	Suzana vd Tempel
DIAGRAMAÇÃO	Bruno Ferreira Nascimento
CAPA	Laís Carniatto
COMUNICAÇÃO	Carlos Eduardo Pereira Débora Nazário Karla Pipolo Olegário
LIVRARIAS E EVENTOS	Estevão Misael
GERÊNCIA DE FINANÇAS	Selma Maria Fernandes do Valle

COMITÊ CIENTÍFICO DA COLEÇÃO SUSTENTABILIDADE, IMPACTO, DIREITO E GESTÃO AMBIENTAL

DIREÇÃO CIENTÍFICA Belinda Cunha

CONSULTORES	Dr. José Renato Martins (Unimep)	Maria Cristina Basílio Crispim da Silva (UFPB)
	Dr. José Carlos de Oliveira (Unesp)	Iranice Gonçalves (Unipê)
	Fernando Joaquim Ferreira Maia (UFRPE)	Elisabete Maniglia (Unesp)
	Sérgio Augustin (UCS)	Prof. Dr. José Fernando Vidal de Souza (Uninove)
	Prof. Dr. Jorge Luís Mialhe (Unesp-Unimep)	Hertha Urquiza (UFPB)
	José Farias de Souza Filho (UFPB)	Talden Farias (UFPB)
	Zysman Neiman (Unifesp)	Caio César Torres Cavalcanti (FDUC)

INTERNACIONAIS	Edgardo Torres (Universidad Garcilaso de la Veja)
	Ana Maria Antão Gerales (Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa)
	Maria Amélia Martins (Centro de Biologia Ambiental Universidade de Lisboa)
	Dionisio Fernández de Gatta Sánchez (Facultad de Derecho. Universidad de Salamanca)
	Alberto Lucarelli (Università degli Studi di Napoli Federico II)
	Luiz Oosterbeek (Instituto Politécnico de Tomar)

Aos nossos pais, por todo amor e cuidados dispensados.

AGRADECIMENTOS

Os autores devem seus agradecimentos, primeiramente, ao INPE e a UNIFESP, que forneceram o suporte institucional necessário para a concretização desta obra e ao CNPq, FAPESP e CAPES, pelo contínuo suporte das atividades de pesquisa desenvolvidas ao longo das últimas décadas.

Os agradecimentos estendem-se igualmente aos membros passados e atuais da equipe de trabalho do laboratório LABREN, que tem dedicado grande esforço, com empenho e entusiasmo, para o avanço do conhecimento científico na área de energias, solar e eólica, e cujo trabalho contribuiu muito para concretização desta obra. Agradecimentos especiais são dedicados à Silvia V. Pereira, por sua constante contribuição na confecção e revisão de ilustrações, imagens, tabelas e gráficos que aparecem neste livro. Este trabalho é também uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) e da Sub Rede de Energias renováveis da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais – Rede Clima (MCTIC), ambos os programas constituem um importante pilar de apoio às atividades de Pesquisa e Desenvolvimento do Plano Nacional de Mudanças Climáticas.

Finalmente, e não menos importante, agradecemos a nossas esposas, Fátima e Fabiana, as quais estiveram ao nosso lado durante todas as fases de construção desta obra, prestando aquele velado apoio, sem o qual este trabalho teria sido muito mais extenuante.

PREFÁCIO

A energia solar sempre foi vista como uma alternativa sustentável para o suprimento energético da humanidade, porém barreiras tecnológicas e econômicas sempre impediram seu uso em larga escala. Tal realidade está mudando rapidamente; a redução contínua dos custos de geração de energia de fonte solar, associada ao advento de novas tecnologias, tem propiciado um acelerado crescimento do seu uso em larga escala. Isso trará, nas próximas décadas, importantes transformações na matriz energética mundial, com uma contribuição cada vez maior das energias renováveis.

Entre as maiores demandas decorrentes dessa nova realidade energética estão a necessidade de medir com qualidade o recurso solar e a busca por meios para estimar a sua disponibilidade. Hoje em dia, a medição precisa e confiável é feita por redes de estação de superfície que, apesar da exatidão pontual dos dados coletados, sempre terão limitações no que tange à cobertura espacial. Para resolver essa questão, imagens de satélite já são utilizadas desde a década de 80 para estimar a radiação solar na superfície terrestre a partir de modelos físicos, estatísticos ou híbridos. As imagens de satélite vêm apresentando melhorias significativas tanto na sua resolução espacial (atualmente é de 1x1 km no ponto da Terra imediatamente abaixo do satélite) quanto na resolução temporal (intervalo de 15 minutos entre imagens). Estes avanços permitiram que os modelos derivados de imagens de satélite tivessem suas incertezas reduzidas, aumentando a confiabilidade nos dados estimados.

Esta obra detalha aspectos fundamentais da área, incluindo uma revisão sobre relações astronômicas e irradiação solar e passando por aspectos relacionados à medição das diferentes variáveis relacionadas à energia solar. Os autores apresentam de forma didática tanto os modelos para estimativa de radiação solar, quanto os

fundamentos físicos utilizados e validados com dados de superfície de diversas regiões do país.

Com muita satisfação recebo esse livro dos colegas Enio Bueno Pereira e Fernando Ramos Martins, que, de forma resumida e clara, apresentam informações relevantes para os diversos atores envolvidos com a área. Pesquisadores da área de clima e meio ambiente, as diversas áreas de engenharia e arquitetura relacionadas com energia, agricultura, formuladores de políticas públicas, além de outros profissionais terão uma excelente base de referência para consulta. Com a autoridade proporcionada por mais de 30 anos atuando na área, os autores fazem com que pela primeira vez conteúdo com essa abrangência seja apresentado em português. Os modelos vêm sofrendo constantes melhorias à medida que novos produtos de satélite são fornecidos e a capacitação de pessoal é necessária para dar continuidade ao trabalho nessa área. Pela sua forma didática de apresentar os conteúdos, esse livro será referência também na área de ensino.

Florianópolis, 14 de Outubro de 2018

Prof. Dr. Eng. Samuel Luna de Abreu

Professor associado do Instituto Federal de Santa Catarina

Ex-presidente da Associação Brasileira de Energia Solar

APRESENTAÇÃO

Como principal fonte de energia do sistema Terra/Atmosfera, o conhecimento sobre a radiação solar e os processos físicos que ocorrem até a incidência na superfície do planeta é uma condição básica para a meteorologia e climatologia. A radiação solar é a principal fonte de energia do sistema Terra/Atmosfera e regula o equilíbrio termodinâmico e climático do planeta.

Ademais, o conhecimento da irradiação solar também desempenha papel importante em diversas áreas das atividades humanas, tais como o agronegócio, a arquitetura e construção civil. No momento atual, a conversão da energia solar em eletricidade está em forte crescimento em várias regiões do mundo, incluindo o Brasil, de modo que a capacidade de estimar e prever o recurso energético solar é fundamental para o planejamento e operação do sistema elétrico e de plantas de geração solar. No entanto esse crescimento também traz desafios tecnológicos associados às incertezas e à intermitência natural da radiação solar incidente na superfície, e que serão superados com a formação de recursos humanos baseada em sólido conhecimento científico para dar suporte ao desenvolvimento de tecnologias e inovações que promovam a viabilidade técnica e econômica do recurso solar. O livro pretende preencher uma importante lacuna na disseminação do conhecimento visando à promoção da inserção da energia solar na matriz elétrica brasileira.

Este livro é resultado de uma parceria longa que teve início com uma visita ao Prof. Enio Pereira em São José dos Campos no final dos anos 90. Ali, discutimos as diretrizes para minha pesquisa de doutorado envolvendo modelagem numérica para avaliação da irradiação solar incidente no território brasileiro desenvolvida no INPE sob sua orientação e com financiamento da FAPESP. Desde então, trilhamos um bom percurso em projetos de pesquisa

e desenvolvimento tecnológico que nos proporcionou a experiência e oportunidade de elaborar este livro.

O material que compõe o livro foi desenvolvido, utilizado e aprimorado inúmeras vezes como resultado de atividades de treinamento, minicursos e capacitação técnica ministrados pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia ao longo dos últimos anos. Somado a isso, tivemos também a oportunidade de participar juntos de vários projetos internacionais com foco nos estudos e levantamentos dos recursos de energia solar e eólica, entre eles o SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), cujos resultados são até hoje bastante utilizados pelo setor de energia. O foco dessas atividades sempre foi o de promover a disseminação de conhecimento científico adquirido utilizando as tecnologias de sensoriamento remoto, modelagem numérica e bases de dados georeferenciadas sobre o recurso de energia solar no Brasil. Esta publicação visa a consolidar esse esforço ampliando o alcance a um público mais amplo e utilizando uma sólida abordagem técnica, porém com uma linguagem que facilite a compreensão daqueles que estão iniciando suas atividades e aprimorando suas habilidades e competências na avaliação da disponibilidade e variabilidade espaço-temporal deste recurso de energia.

Acreditamos que o livro pode ser utilizado como texto de suporte pedagógico em unidades curriculares de cursos de Engenharia e de outras ciências exatas que tratem sobre o aproveitamento do recurso solar uma vez que aborda tópicos diretamente relacionados à avaliação e prospecção do recurso energético. Seu escopo, porém, não aborda as tecnologias de conversão da energia solar em eletricidade e/ou em energia térmica, uma vez que esse tema já é tratado em literaturas específicas. O foco desta obra está na abordagem de tópicos que permitem compreender o que é a radiação solar e como avaliar o recurso energético incidente na superfície para aproveitamento e geração de energia.

O livro aborda os aspectos astronômicos e atmosféricos que influenciam na distribuição espacial e nas variabilidades sazonais da incidência de radiação solar na superfície. Descreve, ainda, os aspectos e cuidados necessários para aquisição de dados de campo e importância que apresentam no desenvolvimento de metodologias e ferramentas computacionais para o levantamento, a previsão e a variabilidade desse recurso energético. O livro termina apresentando e discutindo métodos numéricos com uso de técnicas de sensoriamento remoto utilizadas tanto no mapeamento espacial da energia solar no território brasileiro.

Temos esperança que o conteúdo deste livro seja útil e pedimos que nos informem se identificarem incorreções ou tenham sugestões para o aprimoramento deste material.

Fernando Martins e Enio Pereira

LISTA DE ABREVIATURAS

- Aneel** Agência Nacional de Energia Elétrica.
- AOT** Aerosol optical thickness (espessura ótica de aerossóis).
- Abens** Associação Brasileira de Energia Solar.
- BSRN** Baseline Surface Radiation Network.
- CCST** Centro de Ciência do Sistema Terrestre.
- EPE** Empresa de Pesquisa Energética.
- Inmet** Instituto Nacional de Meteorologia.
- INPE** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- ISO** International Standards Organization.
- Labren** Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia.
- ONS** Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- Sonda** Sistema de Organização de Dados Ambientais aplicados ao setor de energia.
- Unifesp** Universidade Federal de São Paulo.
- WebMet** The Meteorological Resource Center.
- WMO** World Meteorological Organization (Organização Mundial de Meteorologia).
- WRC** World Radiation Center.

SUMÁRIO

1

INTRODUÇÃO	19
------------------	----

2

RELAÇÕES ASTRONÔMICAS ENTRE SOL E TERRA APLICADAS AO APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR	25
---	----

2.1 LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA	26
---	----

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS ASSOCIADOS À POSIÇÃO RELATIVA ENTRE SOL E TERRA.....	29
--	----

2.2.1 Declinação Solar (δ).....	32
--	----

2.2.2 Equação do Tempo e Ângulo Horário Solar (ω)	34
--	----

2.2.3 Ângulo Zenital Solar (θ_z) e Elevação solar (α).....	35
--	----

2.2.4 Ângulo Azimutal Solar (ψ_s)	36
--	----

2.2.5 Fotoperíodo (N_d)	37
-----------------------------------	----

2.2.6 Ângulo de Incidência Solar (θ) em superfície inclinada em relação a horizontal	39
--	----

2.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERCURSO SOLAR.....	39
--	----

3

RADIAÇÃO SOLAR – CARACTERÍSTICAS E DEFINIÇÕES	43
---	----

3.1 ATMOSFERA TERRESTRE.....	45
------------------------------	----

3.2 TERMINOLOGIA E COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR.....	53
---	----

4

AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO	59
-----------------------------------	----

4.1 HELIÓGRAFO DE CAMPBELL-STOKES	62
---	----

4.2 ACTINÓGRAFO.....	63
----------------------	----

4.3 PIRANÔMETROS.....	65
-----------------------	----

4.3.1 Piranômetros termoeletricos	65
---	----

4.3.2 Piranômetros Semicondutores.....	69
4.4 PIRGEÔMETRO.....	71
4.5 PIRHELIÔMETRO.....	73
4.6 SISTEMAS DE SOMBREAMENTO	75
4.7 RADIÔMETRO DE BANDA ROTATIVA (ROTATING SHADOW BAND).....	76
4.8 ESPECTRÔMETRO ÓTICO.....	78
4.9 FOTÔMETRO SOLAR.....	79
4.10 IMAGEADOR DO CÉU	81
4.11 CLASSES DE RADIÔMETROS E INCERTEZA DAS MEDIDAS.....	84
4.12 REQUISITOS PARA UMA ESTAÇÃO DE COLETA DE DADOS SOLARIMÉTRICOS	90
4.13 ARMAZENAMENTO DOS DADOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA	96
4.14 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	100
4.14.1 Manutenção diária.....	100
4.14.2 Manutenção semanal (ou quinzenal, ou mensal)	101
4.14.3 Manutenção semestral (ou anual, quando possível)	102
4.14.4 Calibração dos piranômetros	102
4.14.5 Controle de qualidade dos dados	105

5

MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À ENERGIA SOLAR..... 109

5.1 DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA.....	110
5.2 MODELAGEM DA IRRADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE	111
5.3 MODELOS SATELITAIS.....	116
5.4 MODELO BRASIL-SR.....	120
5.5 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS PRODUZIDAS POR MODELAGEM NUMÉRICA.....	126

REFERÊNCIAS133

INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia e de alimentos vem acarretando profundas mudanças no meio ambiente e na qualidade de vida, colocando a humanidade diante de novos desafios em um planeta com recursos naturais finitos. O crescimento da demanda energética, somado à perspectiva de redução dos suprimentos de fontes de energias convencionais, tem sido motivo de preocupação com implicações na economia global.

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR5, 2014) adverte que as mudanças climáticas globais são uma realidade e decorrem, sobretudo, do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo consumo de combustíveis fósseis. Sem dúvida, um esforço mundial já vem sendo desenvolvido para o uso cada vez mais intenso das energias de fontes renováveis que causem menor impacto socioambiental nos próximos anos, como uma das formas de mitigar os efeitos do aquecimento global. Definimos fonte de energia renovável como aquela que vem de recursos naturais e que é naturalmente reabastecida ou que é teoricamente inesgotável. Além da redução de emissões dos gases de efeito estufa, esses esforços promovem o desenvolvimento sustentável e em equilíbrio com o meio ambiente. É também sabido que a segurança energética de uma nação depende da pluralidade de fontes de energia que compõe sua matriz energética.

A grande maioria das fontes de energia alternativa e renovável apresenta um potencial teórico que supera a demanda mundial conforme apresentado na Tabela 1.1. Entre essas fontes, a energia solar é a que mais se destaca. Embora todas elas se mostrem capazes de

suprir as necessidades energéticas da humanidade sem comprometer o conceito de sustentabilidade, o grande desafio é o de aproveitar tais capacidades de uma maneira economicamente competitiva.

TABELA 1.1 - POTENCIAL TEÓRICO MUNDIAL DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

Fonte	Fluxo Anual (EJ/ano)	Porcentagem da produção pri- mária global
Energia Solar	3.900.000	687.831%
Energia Eólica	28.400	5.009%
Bioenergia	1.900 - 3.000	335% - 529%
Energia Geotérmica	1.300	229%
Energia dos Oceanos	700 - 3.350	123% - 591%
Energia Hídrica	130 - 315	23% - 56%
Produção Primária Global	567	

FONTES: Moriarty e Honnery (2012), Fouquet (2011), Report #IEO2017 (2017).

A matriz brasileira de energia elétrica apresenta-se relativamente limpa quando comparada a da maioria dos países, particularmente a dos países com alto nível de desenvolvimento econômico e social. Nossa geração de eletricidade está baseada principalmente no aproveitamento dos recursos hídricos, portanto renovável. Contudo esse cenário está sendo alterado, não somente em razão da crescente demanda de energia, mas também em resposta aos eventos extremos de seca mais frequentes nas últimas décadas. Além disso, o uso de recursos hídricos destinados à geração de eletricidade concorre com usos destinados à agricultura, ao abastecimento urbano, à manutenção da biocapacidade e outros fins.

Aliada à necessidade de diversificar as fontes de energia e de reduzir a dependência do recurso hídrico, existem ainda os compromissos da implementação do Acordo de Paris sobre Mudança do Clima e da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com

base nas chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês), correspondentes à diminuição de emissão de gases de efeito estufa. O país incluiu em sua NDC a meta de reduzir em 37% as emissões de gases de efeito estufa em 2025 e de 43% em 2030, ambas com relação a 2005, e alcançar 45% de participação de fontes renováveis de energia (incluindo hidrelétrica) em sua matriz primária de energia. Alguns objetivos da Agenda 2030 têm um claro componente ambiental de garantir acesso à energia limpa, promover consumo e produção responsáveis e de tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis.

Conforme indica o Atlas Brasileiro de Energia Solar¹, apesar de o Brasil ser um país com dimensões continentais, apresenta excelentes condições para a geração de eletricidade empregando a tecnologia solar em todo seu território. As características climáticas locais ou regionais definem a melhor tecnologia de geração solar a ser implementada. Como exemplo, a tecnologia de geração heliotérmica requer altos níveis de radiação direta normal incidente (DNI) que, por sua vez, sofre impacto de elevada concentração de aerossóis na atmosfera, além da nebulosidade. Já a geração de energia empregando tecnologia fotovoltaica sofre influência da temperatura do ar. Por isso, o desenvolvimento de metodologias destinadas ao levantamento do recurso solar merece especial atenção e foi um dos motivos para a produção deste livro.

O conhecimento sobre o potencial do recurso solar incidente na superfície é essencial, mas não suficiente para impulsionar o aproveitamento dessa fonte de energia, pois a variabilidade desse recurso tem impactos em aspectos técnicos de qualidade e de segurança do sistema elétrico. Assim, a avaliação do potencial de recursos de energia solar numa região envolve basicamente três componentes: a distribuição espacial do recurso solar, sua variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas primeiras componentes. Informações sobre tais componentes são essenciais para elaboração de cenários

¹ PEREIRA et al., 2017.

de aplicação e para estudos de viabilidade de aproveitamento do recurso solar para projetos de usinas fotovoltaicas e plantas de geração heliotérmica.

Embora o dado coletado em superfície, com instrumentação adequada e observando os cuidados devidos de operação e manutenção, seja a fonte mais precisa para conhecimento do potencial de energia solar, constitui uma informação local, com reduzida abrangência territorial. Além disso, o custo de instalação e operação de várias estações de coleta de dados para cobrir uma grande área de interesse com a precisão requerida para o setor energético constitui um fator limitante. O uso de técnicas de sensoriamento remoto empregando dados de satélites geoestacionários e modelos numéricos torna-se, assim, uma alternativa importante para uma análise de grande abrangência territorial e temporal. Estudos^{2 3} indicam que os erros de interpolação de dados observados em estações de superfície afastadas em mais de 40-50 km são superiores aos erros de estimativas produzidas por modelos numéricos, como será visto neste livro.

No setor de energia, as nuvens são uma fonte de grande instabilidade na geração de energia usando tecnologia solar. As nuvens atenuam o fluxo de energia solar que chega à superfície mediante seus efeitos de espalhamento e absorção, causando fortes flutuações na produção de energia de plantas fotovoltaicas⁴⁵⁶. Além disso, essas flutuações da radiação solar acabam produzindo transientes de energia que são incompatíveis com os padrões de segurança estabelecidos para o sistema de distribuição de eletricidade, incluindo a variabilidade da tensão e frequência da rede e geração insuficiente para atender a demanda momentânea do sistema elétrico⁷. Adicio-

² MARTINS; PEREIRA, 2011.

³ PEREZ et al., 1997.

⁴ ARI; BAGHZOUZ, 2011.

⁵ LAVE et al., 2015.

⁶ PEREZ et al., 2016.

⁷ KLEISSL, 2013.

nalmente, eles podem produzir variações rápidas na temperatura do receptor que podem levar ao estresse térmico dos dispositivos⁸. Em razão do exposto, evidencia-se que o setor energético demandará do conhecimento sobre essa variabilidade e de ferramentas de previsão de recursos solares para o planejamento e operação do sistema de geração e distribuição de eletricidade. Aqui, ressalta-se a importância da meteorologia aplicada ao setor de energia, já que a variabilidade do recurso solar é governada por fenômenos meteorológicos na curta e média escala de tempo e climáticos na escala mais longa.

Este livro aborda o conhecimento básico sobre técnicas de levantamento do recurso solar aplicado ao setor de energia e foi organizado para cobrir uma extensa área de conhecimento multidisciplinar, que vai desde uma breve descrição da própria fonte, o Sol, os conceitos astronômicos mais relevantes e a interação da radiação solar com a atmosfera (Capítulos 2 e 3), às técnicas de medida da radiação solar e tratamento dos dados incluindo a operação e manutenção de estações de coleta de dados solarimétricos (Capítulo 4), até as técnicas de levantamento do recurso solar empregando modelos e dados satelitais (Capítulo 5).

⁸ KAZANTZIDIS et al., 2012.

RELAÇÕES ASTRONÔMICAS ENTRE SOL E TERRA APLICADAS AO APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR

Entre os diversos fatores que influenciam a quantidade de energia solar que incide na superfície da Terra, os movimentos da Terra em sua órbita são aqueles que estabelecem a sazonalidade diária e anual da variabilidade do recurso solar. A Terra realiza um movimento de translação em torno do Sol em uma órbita elíptica. Esse movimento cíclico possui período de um ano e estabelece o ciclo das estações do ano – verão, outono, inverno e primavera. Além disso, a Terra realiza um segundo movimento de rotação em torno de um eixo polar que possui período de 24 horas e define o ciclo diário de incidência solar em nosso planeta. A quantidade de energia solar que incide na superfície da Terra apresenta uma distribuição espacial e variação sazonal intrinsecamente associadas aos movimentos relativos entre nosso planeta e o Sol. A combinação dos dois movimentos com a inclinação do eixo de rotação da Terra, em $23,45^\circ$ em relação ao plano da órbita (vide Figura 2.1), determinam o percurso aparente do Sol sobre um dado ponto da superfície ao longo de período de um dia e ao longo do ano. Equações empíricas permitem determinar, com excelente precisão, a posição do Sol no céu em qualquer momento do ano. Essa informação é essencial para estimativa da irradiância solar incidente sobre os sistemas de aproveitamento da energia solar para geração de eletricidade ou aquecimento de água.

Este capítulo apresenta a metodologia para cálculo da posição do Sol do céu em qualquer momento por meio da determinação dos

ângulos zenital e azimutal do Sol. Essa informação é essencial para determinar tanto a quantidade de energia solar incidente em uma superfície quanto avaliar os períodos de sombreamento em locais de operação de sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar.

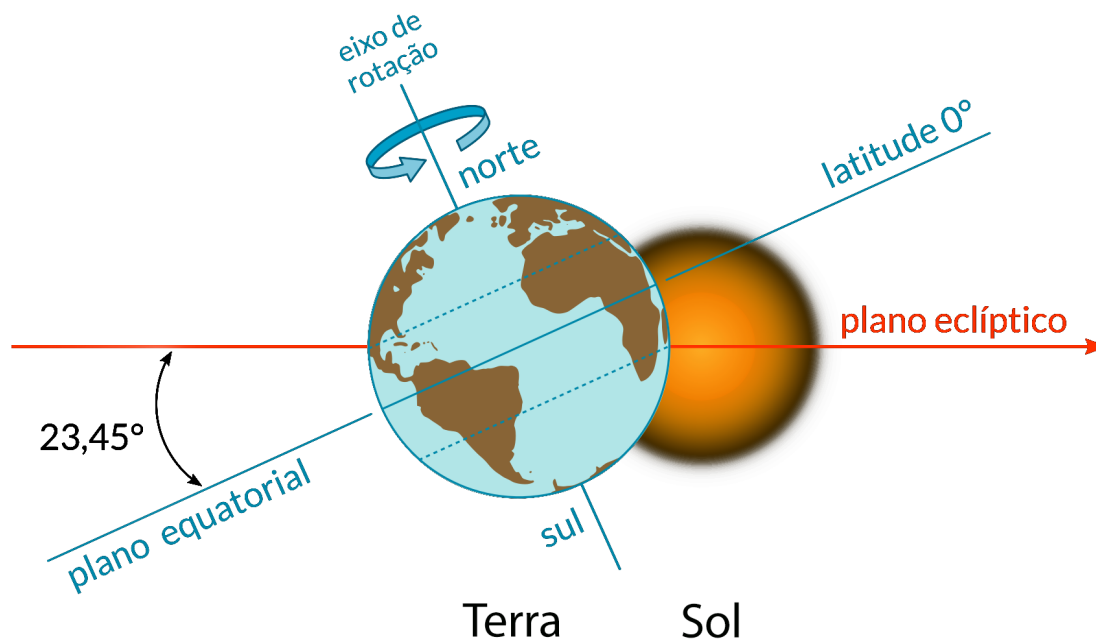


FIGURA 2.1 - ILUSTRAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA EM RELAÇÃO AO PLANO DA ÓRBITA TERRESTRE (PLANO ECLIPTICO)

FONTE: Os autores.

2.1 LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA

É bastante intuitivo perceber que apenas parte da energia emitida nas reações de fusão que ocorrem no Sol chega ao nosso planeta. Para tal, é necessário considerar que a energia emitida pelo Sol propaga-se isotropicamente pelo espaço de modo que a energia solar incidente em qualquer ponto do espaço será proporcional ao inverso do quadrado da distância ao Sol conforme ilustrado na Figura (2.2).

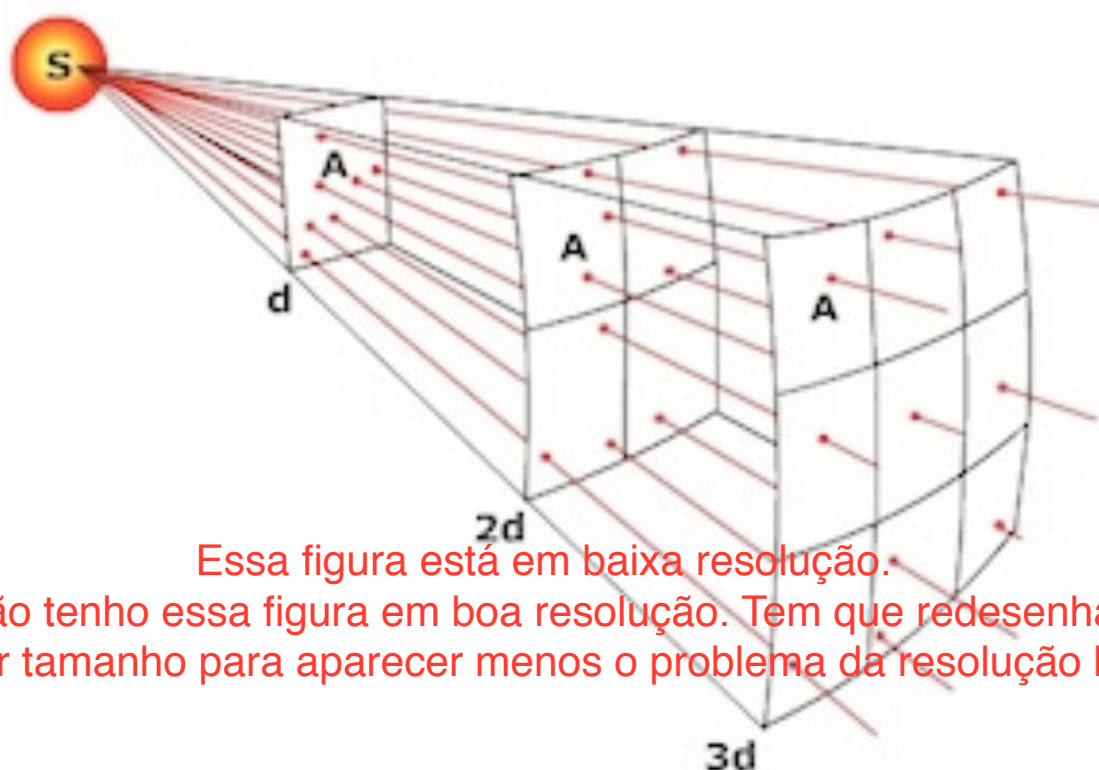


FIGURA 2.2 - LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA. A FIGURA ILUSTRA A REDUÇÃO DA DENSIDADE DE FEIXES SOBRE A MESMA SUPERFÍCIE EM RAZÃO DO AUMENTO DA DISTÂNCIA À FONTE

FONTE: Os autores.

A Terra está em uma órbita ligeiramente elíptica com uma separação média de $149,6 \times 10^6$ km do Sol, distância que equivale a uma Unidade Astronômica (UA). Como a intensidade de energia radiante diminui proporcionalmente ao inverso da distância ao quadrado, apenas uma fração da energia emitida pelo Sol atinge o topo da atmosfera. O fluxo de radiação luminosa do Sol na distância de uma Unidade Astronômica é conhecido constante solar (S_0) e tem o valor de $1360,8 \pm 0,5$ W/m² obtido a partir de medições extraterrestres realizadas durante o mínimo de atividade solar ocorrido em 2008⁹. Esse valor, na realidade, não é constante e apresenta uma variação cíclica da ordem de 0,2% com período de 11 anos da atividade solar. É importante mencionar que o valor da constante solar é bastante controverso e diversos valores são adotados em estudos científicos e

⁹ NASA, 2018.

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS ASSOCIADOS À POSIÇÃO RELATIVA ENTRE SOL E TERRA

Para compreender os ciclos sazonais da radiação solar incidente na superfície, é necessário entender uma série de conceitos estabelecidos com base na posição relativa entre o Sol e a Terra. Inicialmente, vamos rever os seguintes conceitos importantes para estabelecer as relações de posição geográfica:

- | | |
|------------|--|
| Meridianos | São linhas imaginárias que cruzam a superfície da Terra longitudinalmente do Polo Norte ao Polo Sul. Por convenção, o meridiano principal da Terra é o Meridiano de Greenwich, que divide o nosso planeta em dois Hemisférios: Hemisfério Ocidental e Hemisfério Oriental. |
| Paralelos | São linhas imaginárias traçadas perpendicularmente aos meridianos. A Linha do Equador é o paralelo principal que divide a Terra em Hemisfério Norte e Hemisfério Sul. |
| Latitude | É o valor numérico que indica a posição geográfica relativa aos paralelos sendo a latitude 0° (zero grau) definida para a Linha do Equador. A latitude varia entre 0° e 90° (Pólos) sendo que valores positivos de latitude são atribuídos para o Hemisfério Norte (N) e negativos para o Hemisfério Sul (S). |
| Longitude | É o valor numérico que indica a posição geográfica de um ponto na superfície da Terra relativa aos meridianos, sendo a longitude igual a 0° (zero grau) definida para o Meridiano de Greenwich. A longitude varia de varia de 0° a 180° , com valores positivos para o Hemisfério Oriental e negativos para o Hemisfério Ocidental. |

A Figura 2.3 mostra graficamente não só a posição relativa de meridianos e paralelos na superfície terrestre, mas também um aspecto importante que influencia a distribuição espacial de energia solar incidente na superfície do planeta. Trata-se da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à direção normal ao plano da órbita terrestre em torno do Sol.

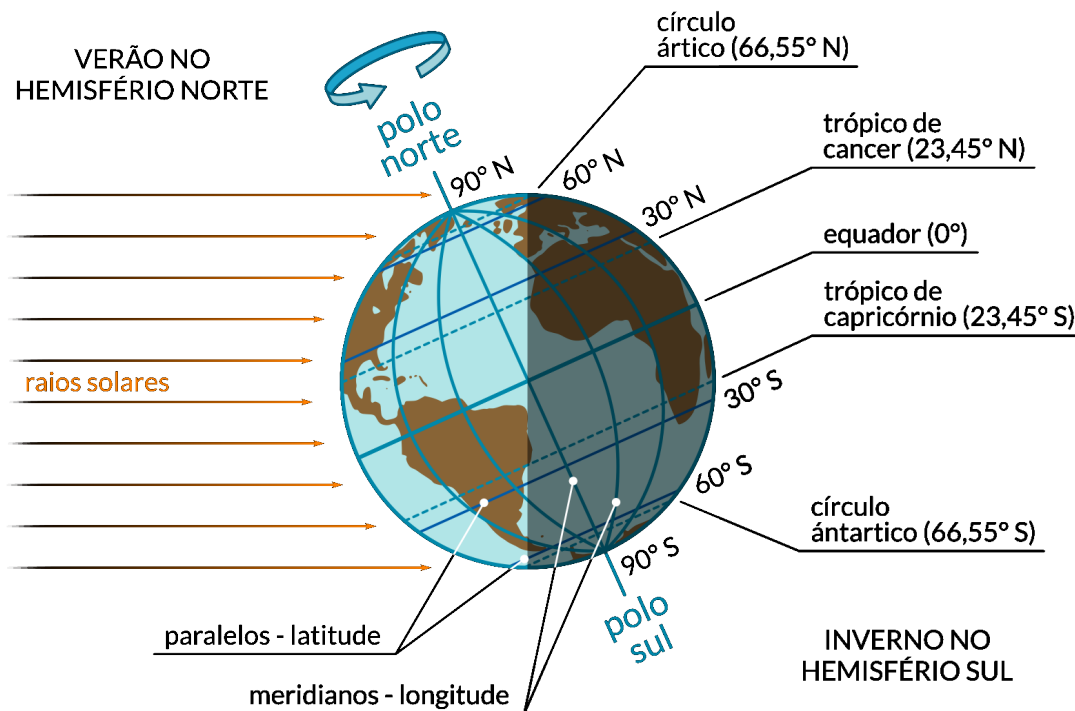


FIGURA 2.3 - ILUSTRAÇÃO INDICANDO OS MERIDIANOS E PARALELOS UTILIZADOS PARA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA NA SUPERFÍCIE TERRESTRE. A IMAGEM TAMBÉM DEMONSTRA COMO A INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO INFLUÊNCIA NA INCIDÊNCIA DIFERENCIADA DE ENERGIA SOLAR ENTRE OS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL

FONTE: Os autores.

A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo completo a cada 365,2564 dias solares. Por causa da inclinação do eixo de rotação da Terra, de 23,45° com relação ao plano orbital, a quantidade de radiação solar recebida por um ponto qualquer na superfície terrestre varia ao longo do ano. Esse aspecto resulta na variação sazonal do clima.

Por convenção astronômica, as quatro estações do ano são determinadas pelos solstícios e equinócios. Os dias de solstícios ocorrem quando o Sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir da linha do Equador (definiremos declinação solar mais adiante neste capítulo). Os solstícios ocorrem duas vezes ao ano e marcam o início das estações de verão e inverno. O dia e hora exatos variam de um ano para outro. O verão

no Hemisfério Sul ocorre quando a declinação solar é negativa, isto é, o Hemisfério Sul está voltado para o Sol. O inverno no Hemisfério Sul ocorre na situação contrária, ou seja, quando a declinação solar é positiva e o Hemisfério Norte está voltado para o Sol (vide Figura 2.4).

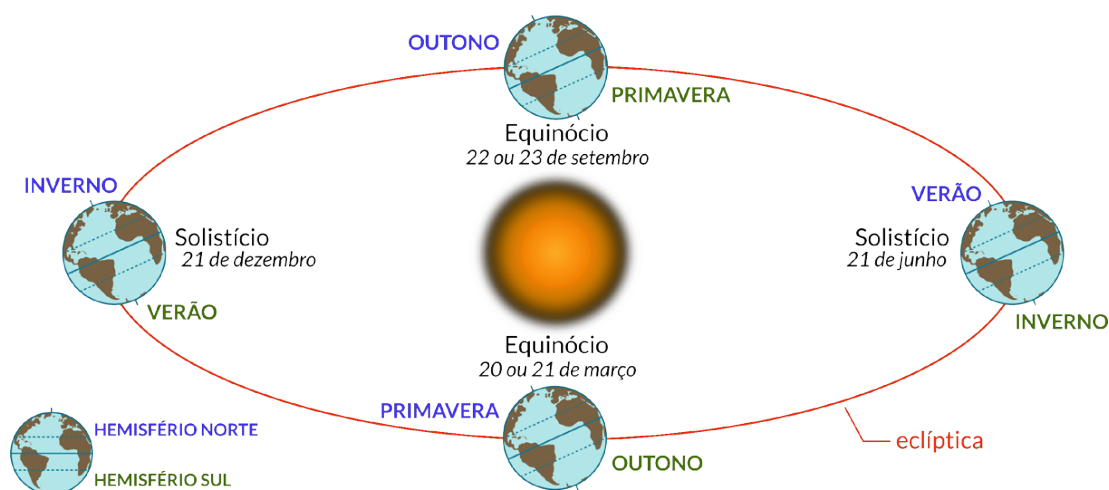


FIGURA 2.4 – A ÓRBITA ELIPTICA DA TERRA EM TORNO DO SOL EM CONJUNTO COM A INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA DEFINE AS ESTAÇÕES DO ANO E SAZONALIDADE DA INCIDÊNCIA DE ENERGIA SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

FONTE: Os autores.

A palavra Equinócio tem origem no latim e significa “noite igual”. Quando ocorre o Equinócio, a duração do dia é igual à duração da noite em ambos os hemisférios. Nas datas em que os equinócios acontecem, o Sol fica posicionado sobre a linha do Equador, e a radiação solar incide com a mesma intensidade sobre os dois hemisférios. Isso acontece normalmente por volta dos dias 20 ou 21 de março e dos dias 22 ou 23 de setembro. Os dias de Equinócio marcam o início do outono e primavera nos dois hemisférios. A duração das noites diminui durante o período da primavera até atingir o valor mínimo no solstício de verão. O inverso ocorre durante o período de outono com o aumento da duração das noites até atingir o máximo no solstício de inverno.

Considerando esses conceitos básicos, podemos agora passar a determinar os parâmetros necessários para a determinação do percurso aparente do Sol ao longo dos dias do ano.

2.2.1 Declinação Solar (δ)

Em razão da inclinação constante do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da órbita terrestre em torno do Sol, a linha imaginária que une o centro dos dois corpos não passará sempre pela linha do Equador terrestre. A declinação do Sol é a distância angular medida a partir da linha do Equador até paralelo interceptado pela linha que une o centro do planeta ao Sol conforme ilustra a Figura 2.5. A declinação pode ser Norte (valores positivos) ou Sul (valores negativos) consoante o Sol esteja acima ou abaixo do Equador terrestre. O Equador da Terra está inclinado cerca de $23^\circ 26'$ em relação ao plano da órbita à volta do Sol. Assim, durante a translação, a declinação varia de $23^\circ 26'$ norte até $23^\circ 26'$ sul e vice-versa.

A declinação solar, medida em graus, pode ser determinada fazendo uso da expressão empírica (2.5) que ajusta o valor da declinação solar em função do dia do ano. Essa formulação é indicada por Iqbal¹¹ como mais adequada para uso em códigos numéricos para automatização de cálculos.

$$\begin{aligned} \delta = \frac{180}{\pi} & (0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cos(2\Gamma) + 0,000907 \sin(2\Gamma) \\ & - 0,002697 \cos(3\Gamma) + 0,00148 \sin(3\Gamma)) \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde Γ está definido na expressão (2.3). A expressão (2.6) também é utilizada frequentemente para determinação da declinação. Apesar de fornecer resultados aproximados, os resultados obtidos atendem aos requisitos de confiabilidade exigidos para o setor energético.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left\{\left(\frac{360}{365}\right) \cdot (DIA + 284)\right\} \quad (2.6)$$

¹¹ IQBAL, 1983.

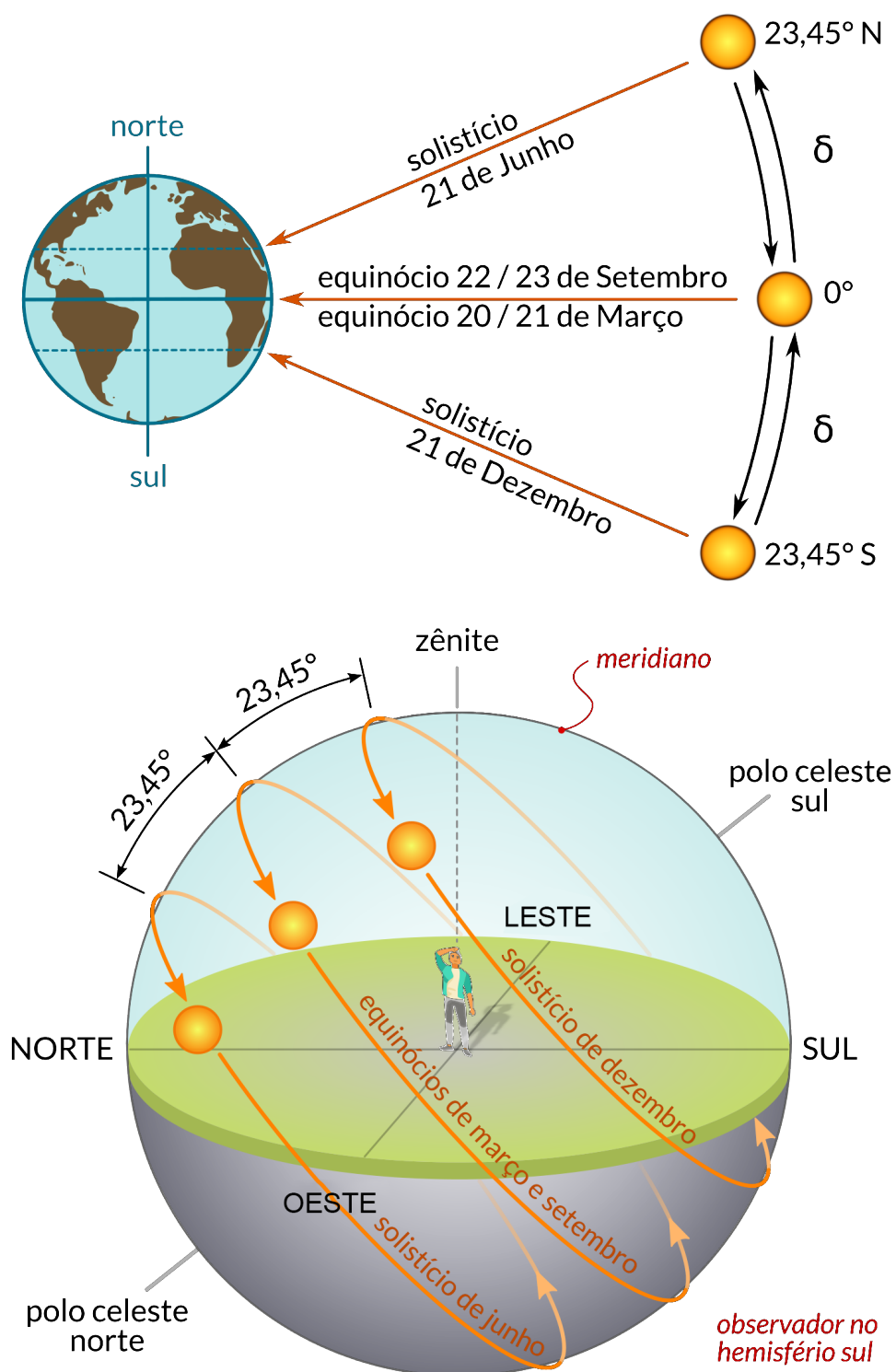


FIGURA 2.5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DECLINAÇÃO SOLAR E SUA VARIAÇÃO ANUAL DECORRENTE DA INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA EM RELAÇÃO AO PLANO DA ÓRBITA TERRESTRE
FONTE: Os autores.

2.2.2 Equação do Tempo e Ângulo Horário Solar (ω)

O Sol é a principal referência astronômica para a medição do tempo uma vez que seu movimento aparente diário é cíclico e de fácil observação. O horário solar aparente é definido com base no movimento diário do Sol. No entanto é importante destacar que o horário solar aparente não acompanha perfeitamente o horário registrado em nossos relógios (horário civil). O horário solar aparente não progride de maneira uniforme já que os dias solares aparentes não têm a mesma duração durante o ano em razão da excentricidade da órbita (não circular) e da inclinação do eixo axial em relação ao plano da órbita terrestre.

O horário civil (aquele que registramos com uso de relógios) segue um astro fictício chamado Sol Médio que se move com velocidade constante sobre o Equador Celeste. Desse modo, o horário civil é também chamado de Horário Solar Médio e segue os padrões estabelecidos para um dado fuso horário associado a um meridiano de referência para a organização das atividades socioeconômicas.

$$E_t = 229,18 \cdot \begin{pmatrix} 0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \sin(\Gamma) \\ -0,014615 \cos(2\Gamma) + 0,04089 \sin(2\Gamma) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Margem esquerda ultrapassada

onde Γ está definido na equação (2.3) e o valor 229,18 é o fator de conversão de radianos para minutos.

As equações (2.8) deve ser utilizada para determinar o horário solar aparente ($h_{aparente}$) a partir do horário civil (h_{civil}), incluindo o fuso horário do local do observador da trajetória do Sol no céu.

$$h_{aparente} = h_{médio} + E_t$$

$$h_{aparente} = h_{civil} + Fuso\ horário + E_t \quad (2.8)$$

Alinhar com formula acima

$$h_{aparente} = h_{civil} + 4(longitude_{local} - longitude_{referência}) + E_t$$

De novo a questão do alinhamento das fórmulas. Vou parar de comentar isso e apenas assinalar as fórmulas que devem ser realinhadas e deixar com a editora esse trabalho, conforme meus comentários acima.

onde $h_{\text{médio}}$ é a hora solar média para o local de interesse localizado no meridiano com $longitude_{\text{local}}$ e com fuso horário estabelecido para o meridiano com $longitude_{\text{referência}}$.

O ângulo horário aparente (ou solar) corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol e varia entre -180° e $+180^\circ$. Cada hora corresponde a 15° de variação do ângulo horário solar. Por convenção, assume valores negativos no período da manhã, e positivos no período vespertino com valor zero ao meio dia. Matematicamente, o ângulo horário aparente (em graus) é calculado com uso da equação (2.9).

$$\omega = (h_{\text{aparente}} - 12) \cdot 15 \quad (2.9)$$

2.2.3 Ângulo Zenital Solar (θ_z) e Elevação solar (α)

O ângulo zenital solar (θ_z) é também conhecido como distância zenital e representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga a superfície da Terra ao Sol. Pode ser calculado conhecendo-se os valores da latitude (ϕ), o ângulo de declinação solar (δ) e o ângulo horário aparente (ω) conforme descrito na equação (2.10). O ângulo zenital solar pode assumir valores entre 0° e 90° . O valor de 90° acontece nos momentos de nascer e por do Sol. O valor de 0° acontece apenas se o Sol atingir o ponto mais elevado do seu percurso quando estiver sobre a linha imaginária perpendicular a superfície no local do observador.

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2.10)$$

O ângulo zenital solar define a direção de propagação do feixe de energia solar desde o Sol até a superfície terrestre se nenhum processo de espalhamento ocorrer ao longo do caminho ótico da radiação na atmosfera. Dessa forma, podemos interpretar o ângulo zenital solar como o ângulo de incidência da radiação solar num

plano horizontal localizado na superfície terrestre, como ilustrado na Figura 2.6.

A elevação solar ou altitude solar (α) é o ângulo complementar ao ângulo zenital solar, isto é, o ângulo formado entre a horizontal no ponto de observação e a direção da linha que liga a superfície da Terra ao Sol. Pode ser facilmente determinado se o ângulo zenital é conhecido ou conforme a equação (2.11). Assim como o ângulo zenital solar, α assume valores entre 0° e 90° ; o valor zero ocorre nos instantes de nascer e por do Sol.

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z = \sin^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2.11)$$

2.2.4 Ângulo Azimutal Solar (ψ_s)

Ângulo azimutal do Sol é formado entre a linha do meridiano no local do observador e a projeção da direção do Sol no plano horizontal (Figura 2.6). O azimuth solar pode assumir valores no intervalo entre -180° e $+180^\circ$ sendo positivo quando o Sol está a leste do meridiano local e negativo quando o Sol está a oeste do meridiano local. Quando o Sol atinge o ponto mais elevado de seu percurso, o valor do azimuth solar será 0° . O valor do azimuth solar em qualquer momento do dia pode ser calculado a partir da equação (2.12).

$$\psi_s = \sin^{-1}(\cos \delta \sin \omega / \sin \theta_z) \quad (2.12)$$

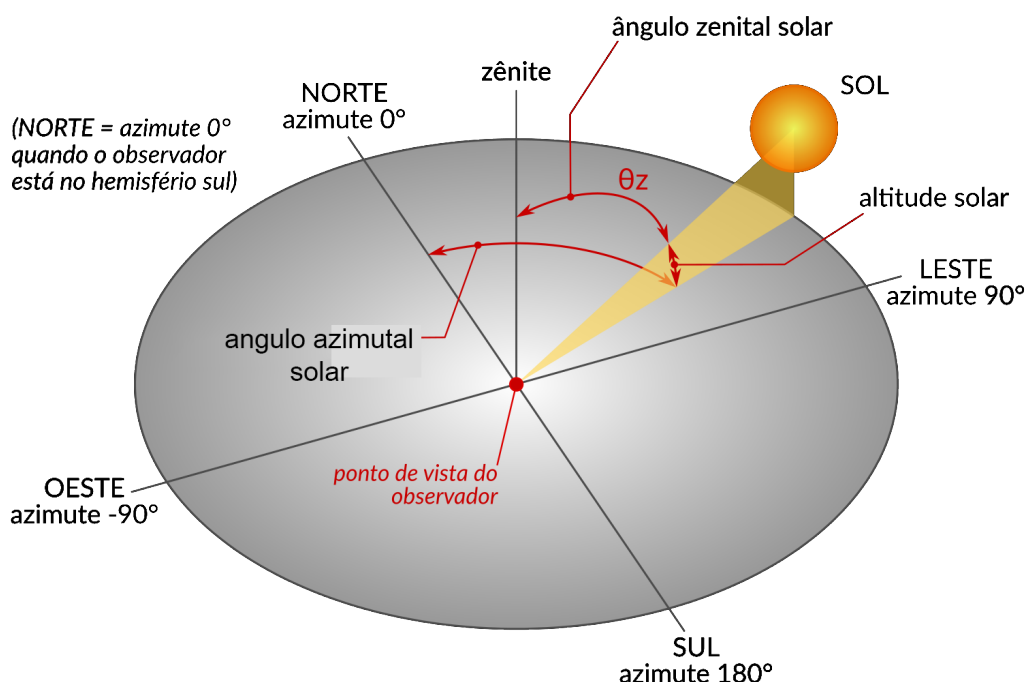


FIGURA 2.6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ÂNGULOS QUE DEFINEM A POSIÇÃO DO SOL NA ABÓBADA CELESTE – ÂNGULO ZENITAL SOLAR, ÂNGULO AZIMUTAL SOLAR E ELEVAÇÃO SOLAR

FONTE: Os autores.

Mais um exemplo de discrepância entre formatos dos símbolos. Ou coloca tudo em *itálico* ou tudo em texto normal. Repare que nas fórmulas a maioria dos símbolos estão em *itálico* então, daria menos trabalho passar os outros para *itálico*.

2.2.5 Fotoperíodo (N_d)

Um conceito muito importante é o fotoperíodo que corresponde ao intervalo de tempo em que o Sol estará realizando seu percurso no céu entre o horário de nascer e o poente. Deve-se ter em mente que o dia já está claro antes de o Sol surgir no horizonte e permanece com alguma iluminância ainda após o poente. Isso dá origem aos conceitos de crepúsculo (alvorada/ocaso) como o definido pela norma ABTN (NBR-5123), que estabelece normas para a iluminação pública e as definições de crepúsculos civil, marítimo e astronômico.

Em resumo, não se deve confundir fotoperíodo com as condições de crepúsculo, que ocorre antes do nascer e após o pôr do Sol. O fotoperíodo (N_d), em horas, pode ser calculado conhecendo-se a latitude local (ϕ) e declinação solar (δ):

$$N_d = \frac{2 \left(\cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \right)}{15} \quad (2.13)$$

A Figura 2.7 ilustra a variação do fotoperíodo ao longo do ano para diversas regiões com latitudes distintas. Para a latitude de 0°, posição do Equador, o fotoperíodo tem a duração de 12 horas durante todo o ano. À medida que nos afastamos da linha do Equador, o fotoperíodo apresenta variação ao longo do ano com fotoperíodos curtos nos meses de inverno e longos nos meses de verão. Um caso extremo ocorre nos dias de solstício nos polos, de forma que o fotoperíodo atinge 24 h no solstício de verão e 0 h no solstício de inverno.

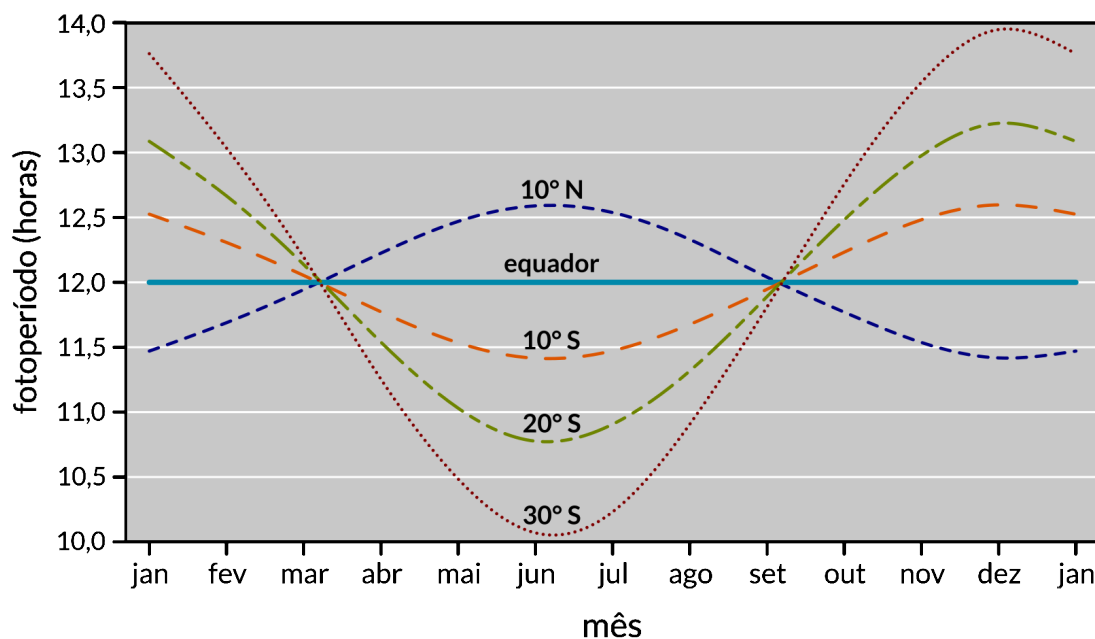


FIGURA 2.7 - CICLO ANUAL DO FOTOPERÍODO EM DIFERENTES LATITUDES. A DURAÇÃO DA NOITE É A MESMO AO LONGO DE TODO O ANO APENAS NO EQUADOR. AS NOITES SÃO LONGAS NO INVERNO E CURTAS NO VERÃO

FONTE: Os autores.

2.2.6 Ângulo de Incidência Solar (θ) em superfície inclinada em relação à horizontal

Conforme mencionado anteriormente no tópico 2.2.3, o ângulo zenital solar define o ângulo de incidência da energia solar num plano horizontal na superfície da Terra. Mas o que ocorre se estivermos interessados em avaliar a substituir por quantidade de energia solar incidente em um plano inclinado? Nessa condição, o ângulo zenital solar não pode ser utilizado como o ângulo de incidência da radiação.

O ângulo de incidência é o ângulo formado entre a normal à superfície coletora de energia solar (painel fotovoltaico, coletor solar, radiômetro) e a linha imaginária ligando a superfície inclinada ao Sol, como ilustrado na Figura 2.8. O ângulo de incidência pode assumir valores entre 0° e 90° e sua determinação matemática pode ser realizada conhecendo-se a declinação solar (δ), a inclinação da superfície (β), o ângulo azimutal do Sol (θ_s), o ângulo horário solar (ω) e a latitude do local (ϕ).

$$\theta = \cos^{-1} \left(\begin{array}{l} \sin\phi \sin\delta \cos\beta - \cos\phi \sin\delta \sin\beta \cos\psi \\ + \cos\phi \cos\delta \cos\beta \cos\omega + \sin\phi \cos\delta \sin\beta \cos\psi \cos\omega \\ + \cos\delta \sin\beta \sin\psi \sin\omega \end{array} \right) \quad (2.14)$$

ou

$$\theta = \cos^{-1} \left(\cos\beta \cos\theta_z + \sin\beta \sin\theta_z \cos(\psi_s - \psi) \right) \quad (2.15)$$

onde ψ é o ângulo azimutal da superfície inclinada. Se a superfície inclinada está no Hemisfério Sul, o valor de ψ é 0° (zero graus) quando a superfície está voltada para o Norte.

2.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERCURSO SOLAR

A projeção do percurso do Sol no plano horizontal é designada por diagrama da trajetória solar. Esse diagrama, ilustrado na Figura 2.9, é uma ferramenta útil para avaliação do sombreamento em sistemas

de aproveitamento da energia solar. A elaboração de um diagrama de trajetória solar é relativamente simples. Basicamente, a linha de trajetória solar é desenhada em um diagrama polar que utiliza o valor de dois ângulos que definem a direção do feixe de radiação solar em determinado momento do dia. O primeiro ângulo é o ângulo de azimuth solar ψ_s (definido no tópico 2.2.4, equação (2.12)), que deve ser registrado sobre as linhas radiais. O segundo ângulo é a elevação solar (α), definido pela expressão (2.11), e que é representado por círculos concêntricos.

A título de exemplo, a Figura 2.9 ilustra o diagrama de trajetória solar uma localidade situada a 20° Sul no dia 16/04 (linha azul). As linhas vermelha e verde indicam os ângulos azimuth solar e elevação solar que determinam a posição do Sol na abóbada celeste às 9h (horário solar aparente).

07h 30min

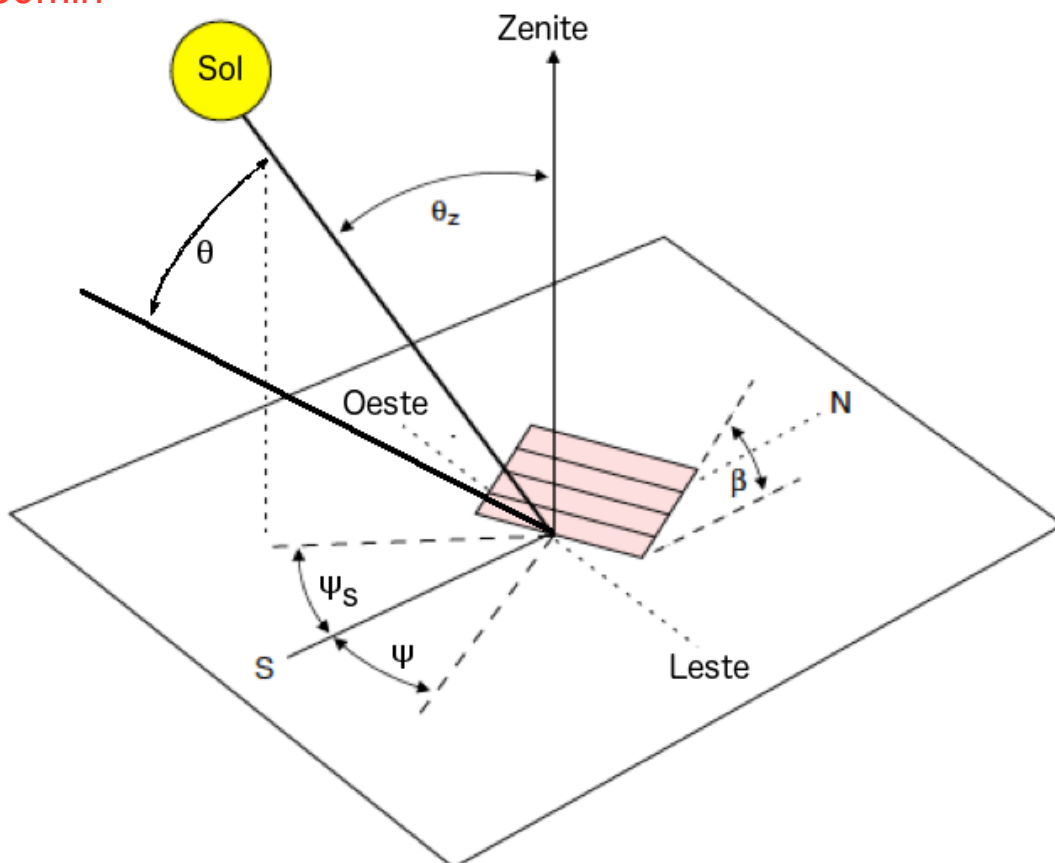


FIGURA 2.8 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DE INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO SOLAR EM UM PLANO INCLINADO EM ÂNGULO β EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE HORIZONTAL

FONTE: Os autores.

Atualmente, há diversos aplicativos para uso em celulares e *tablets* que determinam a trajetória solar com base nas equações indicadas acima. Algumas versões gratuitas apresentam apenas o diagrama polar ilustrado na Figura 2.9, mas versões completas, que demandam investimento financeiro para aquisição, possuem recursos que permitem verificar a trajetória solar em formato tridimensional e com uso de imagens digitais do local de interesse para o estudo ou avaliação.

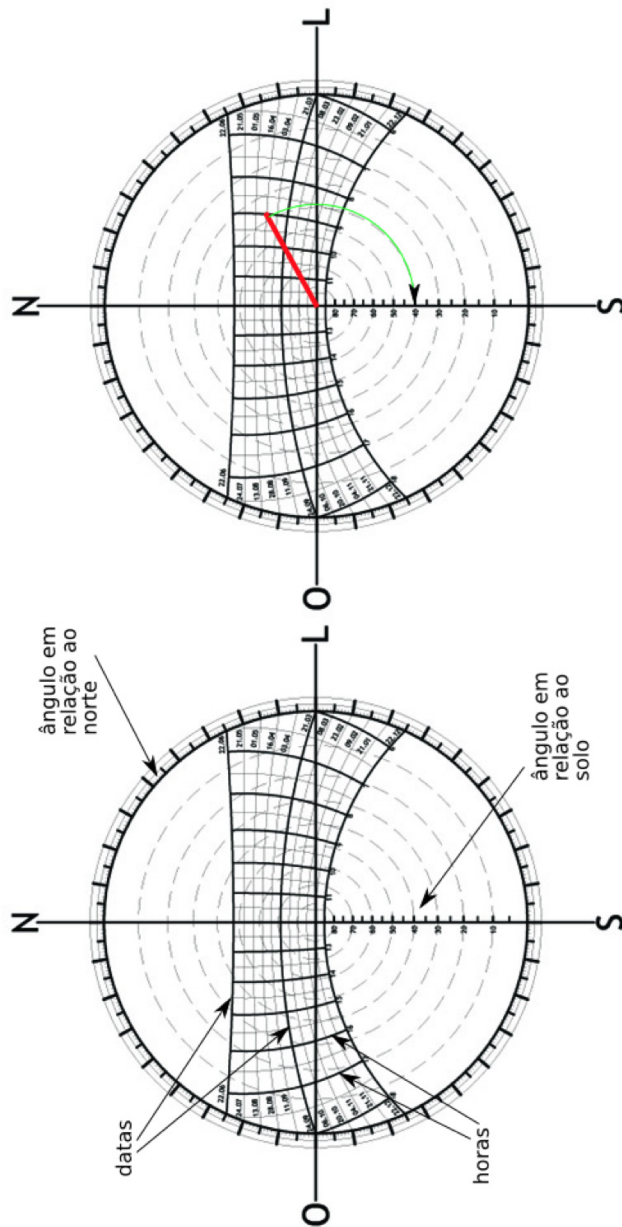


FIGURA 2.9 - PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DO SOL NO DIA 16/04, EM UMA LOCALIDADE SITUADA A 20° SUL, RESULTANDO EM AZIMUTE SOLAR ψ_s DE APROXIMADAMENTE 60° E UM ÂNGULO DE ELEVACÃO SOLAR α IGUAL A 40°

FONTE: Os autores.

Essa figura deveria ter sido redesenhada pela editora - a resolução está péssima e está ilegível. Já que a editora não fez isso eu incluí (em anexo) uma figura com melhor resolução que eu consegui montar. Mas isso demanda algumas correções mínimas no texto acima

RADIAÇÃO SOLAR – CARACTERÍSTICAS E DEFINIÇÕES

O Sol é considerado uma estrela de tamanho médio que emite uma enorme quantidade de energia decorrente da sua fusão nuclear de átomos de Hidrogênio (representa cerca de 75% da composição do Sol) para formar Hélio (cerca de 25% da composição). A fusão nuclear tem mantido o Sol irradiando energia para o espaço na forma de ondas eletromagnéticas a uma taxa aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência atual da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W. A temperatura efetiva do Sol é da ordem de 5505°C (ou 5778 K).

A energia solar é a fonte de energia para todos os processos naturais que ocorrem nas cinco geosferas do sistema terrestre, a saber: atmosfera, biosfera, litosfera, hidrosfera e antroposfera. Contudo, apenas parte da energia emitida pelo Sol atinge o topo da atmosfera de nosso planeta, conforme visto no Capítulo 2. Essa parcela sofre atenuação em seu percurso na atmosfera devido aos processos de interação da radiação com os componentes da atmosfera. Esses processos radiativos possuem uma relevância muito grande para a manutenção da vida em nosso planeta uma vez que atenuam os comprimentos de onda na faixa da radiação ultravioleta e possibilitam a manutenção da temperatura da superfície relativamente estável em torno de um valor médio global da ordem de 15°C , fenômeno conhecido como efeito estufa¹². Os processos radiativos na atmosfera também determinam a disponibilidade e variabilidade da incidência de energia solar na superfície empregada em geração de eletricidade. A Tabela 3.1 ilustra a composição espectral da radiação solar

¹² BARRY; CHORLEY, 2013.

incidente no topo da atmosfera, destacando de interesse as áreas da meteorologia e da geração solar.

TABELA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FAIXAS ESPECTRAIS DA RADIAÇÃO SOLAR COMUMENTE ADOTADA NAS ÁREAS DE METEOROLOGIA E GERAÇÃO SOLAR

Ondas curtas	UV-C	100-280 nm	Nociva aos seres vivos mas totalmente absorvida pela atmosfera. Responsável pela formação da camada de ozônio estratosférico.
	UV-B	280-315 nm	Parcialmente absorvida pela camada de Ozônio, apenas 1% atinge a superfície e é biologicamente danosa. Causa eritema na pele (queimadura)
	UV-A	315-400 nm	Provoca o envelhecimento da pele, mas é necessária em pequenas doses para síntese da vitamina D no organismo.
	Visível	400-780 nm	Representa 46% do total de energia solar incidente.
Ondas longas	IV-A	780-1400 nm	Conhecida como infravermelho próximo e representa aprox. 45% do total de energia solar incidente. O fenômeno fotoelétrico ocorre, na maioria dos semicondutores utilizados em células fotovoltaicos na atualidade, nas regiões espectrais IV-A e visível.
	IV-B	1400 – 3000 nm	

FONTE: Os autores.

Este capítulo discute os fatores principais que determinam a disponibilidade e a variabilidade do recurso de energia solar na superfície da Terra. O capítulo também apresenta, de forma sucinta, os conceitos fundamentais relacionados a transmitância da radiação solar na atmosfera terrestre, com ênfase nos fatores que influenciam no espectro eletromagnético da radiação incidente na superfície da Terra.

3.1 ATMOSFERA TERRESTRE

Para compreender a quantidade de energia e o espectro eletromagnético da radiação solar que incide na superfície da Terra, vamos utilizar três leis fundamentais da física. A Lei de Stefan-Boltzmann descreve a relação de proporcionalidade entre a energia total irradiada por unidade de tempo por unidade de área superficial por um corpo com sua temperatura (T).

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.1)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann que assume o valor $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ e ε é o fator de emissividade do corpo que assume o valor “1” para um corpo negro. Define-se corpo negro como um objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide e irradia energia na mesma taxa que a absorve.

A lei de Wien (ou lei do deslocamento de Wien) relaciona o comprimento de onda para a máxima emissão de radiação eletromagnética (λ_{max}) de um corpo com a temperatura (T), conforme descrito em (3.2):

$$\lambda_{max} \cong \alpha / T \quad (3.2)$$

onde α é a constante de Wien, igual a 2898 m.K. Com ajuda dessas duas leis, podemos compreender por que o espectro da radiação emitida pelo Sol e pela Terra são distintos, como mostrado na Figura 3.1. O espectro da radiação solar que atinge o topo da atmosfera possui comprimentos entre 0,1 e 4,0 μm (radiação de onda curta). Por outro lado, a radiação emitida pela Terra, conhecida como radiação de onda-longa, possui comprimentos de onda no intervalo 3 – 30 μm . A diferença no intervalo dos comprimentos de onda emitidos por cada corpo é explicada pela diferença de temperatura dos dois corpos.

Um detalhe importante sob o ponto de vista de aproveitamento do recurso energético solar está no fato que 46% de toda energia radiante solar incidente na superfície da Terra está concentrada no

intervalo entre $0,4$ e $0,7\mu\text{m}$ (faixa conhecida popularmente como radiação visível). A Figura 3.2 apresenta o espectro de radiação solar que atinge o topo da atmosfera e que incide na superfície da Terra após a atenuação pelos processos radiativos que ocorrem durante o percurso pela atmosfera. Pode-se observar uma atenuação significativa em grande parte do intervalo espectral da radiação solar e que essa atenuação é diferenciada para cada comprimento de onda.

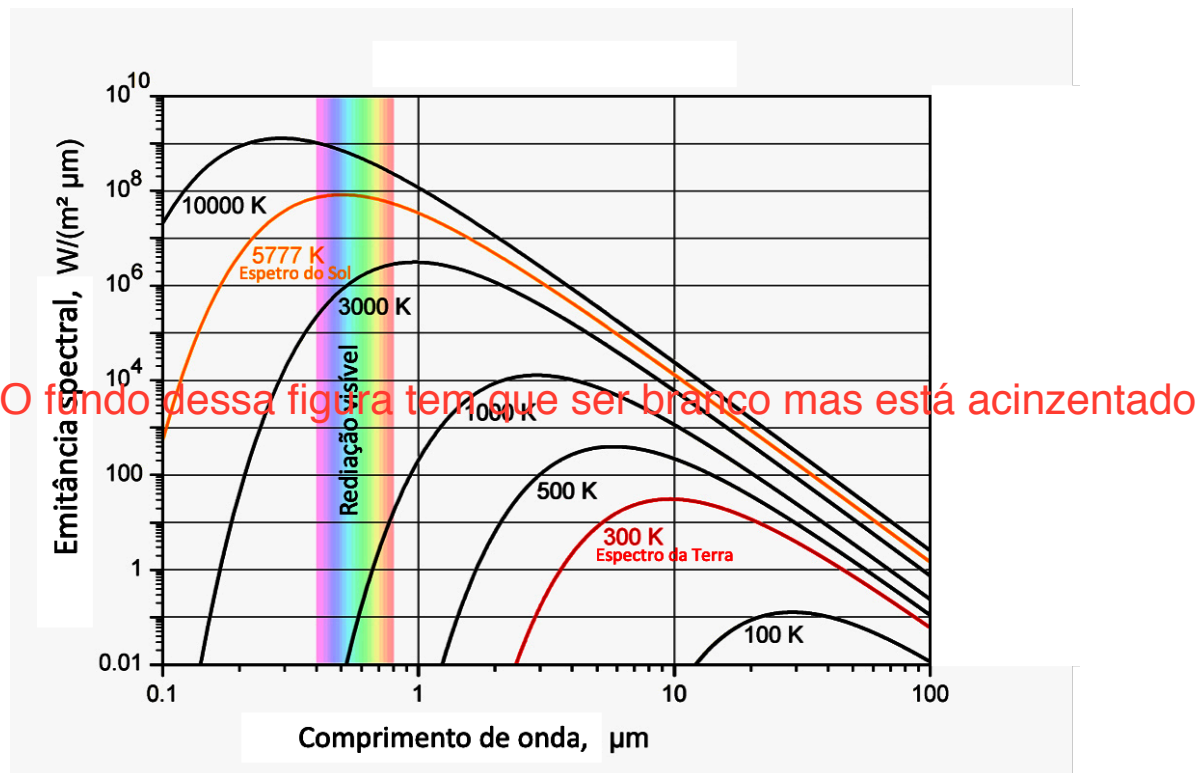


FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO DA FAIXA ESPECTRAL DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA EMITIDA POR UM CORPO NEGRO NAS TEMPERATURAS DO SOL E DA TERRA. A DIFERENÇA ENTRE OS ESPECTROS É DESCRITA PELA LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN

FONTE: Os autores.

A atmosfera terrestre atua sobre o espectro da radiação solar por meio de fenômenos de espalhamento e absorção seletiva em determinados comprimentos de onda. O espalhamento ocorre quando uma fração do feixe de radiação proveniente do Sol é subtraída do fluxo na direção de incidência e é re-irradiada em comprimentos de onda maiores (infravermelho) em direções diversas. O processo de

espalhamento depende da relação entre o tamanho do espalhador e do comprimento de onda da radiação espalhada. O espalhamento causado por gases atmosféricos (dimensão atômico/molecular muito menor que o comprimento de onda da radiação solar) é descrito como espalhamento Rayleigh. Já o espalhamento causado pelas partículas em suspensão na atmosfera e gotículas presentes nas nuvens é descrito pela teoria do espalhamento Mie. A discussão detalhada sobre a interação da radiação solar com a atmosfera está fora do escopo deste livro, recomenda-se a leitura de Yamasoe e Corrêa¹³.

A absorção seletiva de comprimentos de onda específicos da radiação solar ocorre devido a fenômenos quânticos de interação da radiação com a matéria. Os componentes atmosféricos que mais fortemente contribuem para absorção da radiação solar incidente são o O_3 (na faixa ultravioleta), o vapor d'água e o CO_2 (na faixa do visível e infravermelho próximo).

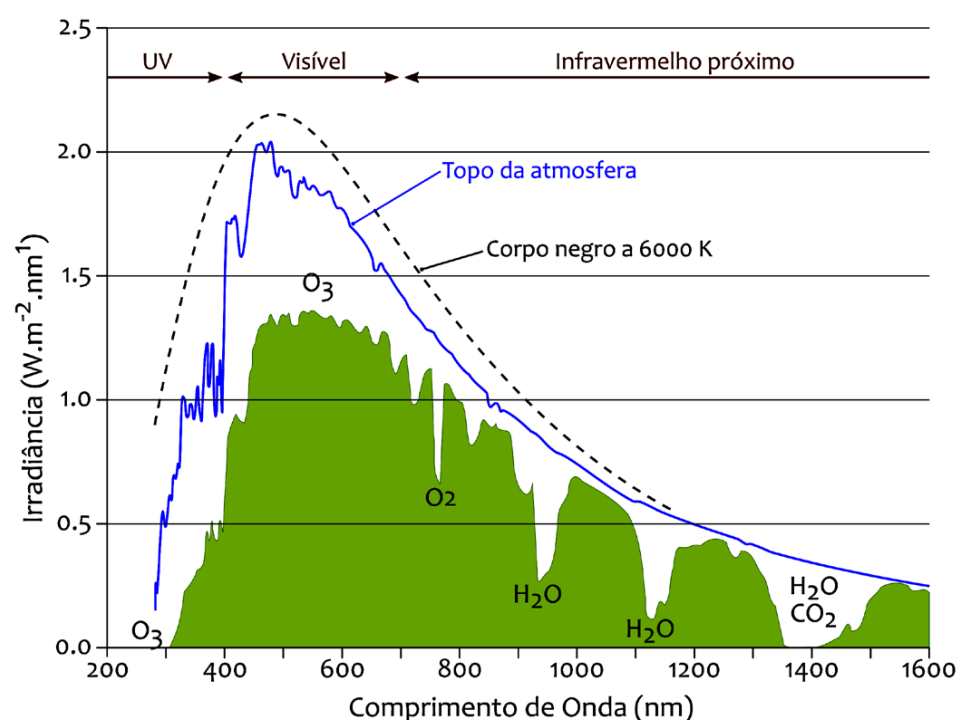


FIGURA 3.2 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO TOPO DA ATMOSFERA E NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

FONTE: Os autores.

¹³ YAMASOE; CORRÊA, 2016.

A absorção e o espalhamento ocorrem simultaneamente, e a atenuação da radiação na atmosfera pode ser expressa pela seção de choque de extinção, σ_{ext} (extinction cross section), definida como a soma das seções de choque de absorção σ_a e de espalhamento σ_s como:

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_a(\lambda) + \sigma_s(\lambda) \quad (3.3)$$

A seção de choque de extinção é um fator de ponderação indicando a eficiência com que a molécula absorve ou espalha a radiação em cada comprimento de onda, ou também pode ser compreendida em termos da probabilidade de uma molécula absorver ou espalhar a radiação eletromagnética incidente num comprimento de onda específico.

Define-se o parâmetro **espessura óptica** (τ_{at}) para quantificar a atenuação de radiação em um meio contendo um material opticamente ativo. A espessura óptica indica a quantidade de compostos absorvedor e espalhador opticamente ativos encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação. É expressa como a integral do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio e a seção de choque de extinção para cada comprimento de onda ao longo do caminho óptico (s) percorrido pelo feixe de radiação solar. Assim, a espessura óptica é expressa por:

$$\tau_{at} = \int \sigma_{ext}(\lambda) N_s ds \quad (3.4)$$

onde ds o caminho de integração e N_s a densidade numérica de átomos ou moléculas opticamente ativas [partículas.cm⁻²].

Se a intensidade da radiação solar que incide no topo da atmosfera é I_o e, após atravessar uma espessura ds da atmosfera, a intensidade é reduzida para o valor I ; a atenuação dI da radiação pode ser expressa na forma:

$$dI = -(\sigma_{ext} N_s) \cdot I \cdot ds \quad (3.5)$$

A equação que define a atenuação da radiação solar ao atravessar uma espessura ds a atmosfera é dada pela integral da equação (3.5) ao longo do percurso:

$$I = I_0 \cdot e^{-\int (\sigma_{ext} N_s) \cdot ds} \quad (3.6)$$

Definindo $ds = dx / \cos(\theta_z)$, onde θ_z é o ângulo *zenital solar*, e chamando $m = 1 / \cos(\theta_z)$ de comprimento ótico ou massa ótica da atmosfera (o símbolo AM também é bastante utilizado para representar a massa ótica), temos:

$$I = I_0 \cdot e^{-\int (\sigma_{ext} N_s) \cdot m \cdot dx} \quad (3.7)$$

A seção de choque de extinção total pode ser determinada pela soma das seções de choque associadas com cada um dos processos radiativos na atmosfera de modo que a equação (3.7) pode ser reescrita como:

$$I = I_0 \cdot e^{-m \cdot \tau_{total}} \quad (3.8)$$

onde:

$$\tau_{total} = \tau_{aero} + \tau_g + \tau_w + \tau_{O_3} + \tau_{CO_2} + \tau_r + \dots etc. \quad (3.9)$$

onde τ_{aero} , τ_g , τ_w , τ_{O_3} , τ_{CO_2} , τ_r representam as espessuras óticas para a interação com aerossóis, com gases como CO_2 e O_2 , vapor d'água, ozônio, dióxido de nitrogênio, e outros gases minoritários. Dessa forma, a Lei de Beer-Lambert, utilizada para descrever a atenuação da radiação solar na atmosfera, pode ser apresentada por:

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\tau_a + \tau_g + \tau_w + \tau_{O_3} + \tau_{CO_2} + \tau_r + \dots \right) \times m \right] \quad (3.10)$$

Fica evidente que os processos radiativos na atmosfera estão intimamente relacionados com a composição da atmosfera. Por exemplo, uma condição em que a atmosfera apresente maior quantidade de particulados em suspensão (aerossóis) devido às atividades

antrópicas ou naturais acarretará maior atenuação da radiação solar incidente na superfície.

A atenuação da radiação solar devido à interação com os gases e partículas ocorre principalmente na estratosfera e na troposfera, camadas atmosféricas mais próximas da superfície e que compreendem cerca de 99,9% da massa total da atmosfera. É na estratosfera, entre 20 e 30 km de altitude, que ocorre a primeira atenuação significativa da radiação solar. A camada de ozônio (O_3) interage com a luz solar principalmente na região do ultravioleta, absorvendo a maior parte da energia radiante nessa faixa do espectro solar (ver Tabela 3.1).

Na troposfera predominam os gases nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), sendo o 1% restante composto de gases como Dióxido de Carbono, Óxido Nitroso, Dióxido de Nitrogênio, Gás Metano e Ozônio, além do vapor de água originados em processos físicos de evaporação e transpiração que ocorrem na superfície. Nessa camada, a radiação solar sofre espalhamento e absorção com as moléculas dos gases que a compõe incluindo as gotículas em nuvens e com os aerossóis atmosféricos. A concentração de alguns desses componentes atmosféricos sofrem variações ao longo do tempo e em função da altitude. Deve-se ter em mente que 50% da massa total da atmosfera encontram-se abaixo de 5,5 km. Portanto, é nessa parte da atmosfera que ocorrem os fenômenos mais intensos de espalhamento e absorção da luz solar.

Enquanto a concentração da maioria dos gases atmosféricos apresenta variação temporal muito pequena e em escala climática, a nebulosidade e a concentração de aerossóis possuem uma variabilidade numa escala de tempo curta, de dias a alguns segundos, portanto, na escala dos fenômenos meteorológicos e micrometeorológicos. Dessa forma, entre os vários componentes atmosféricos que modulam a intensidade da radiação solar que chega à superfície, os mais importantes são as nuvens, seguidas pelos aerossóis.

A Figura 3.3 ilustra o balanço energético do sistema Terra/Atmosfera. Do total (100%) de irradiação solar incidente no topo

da atmosfera, cerca de 30% retornam ao espaço como radiação de ondas curtas devido aos processos de espalhamento na atmosfera, dando o aspecto visual azulado característico do planeta visto pelos astronautas. A essa fração se dá o nome de albedo planetário.

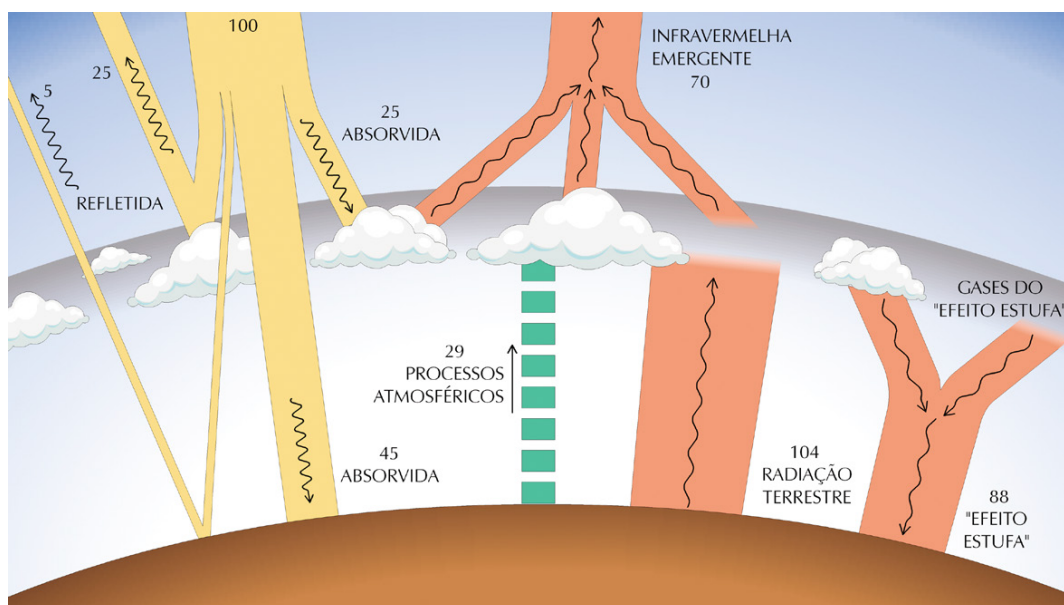


FIGURA 3.3 - DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS RADIATIVOS QUE OCORREM NO SISTEMA TERRA/ATMOSFERA E DETERMINAM O BALANÇO RADIATIVO DO PLANETA

FONTE: Os autores.

Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema Terra/Atmosfera e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A energia absorvida pelo sistema Terra-atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética – 4 a 100 μ m - sendo que 6% é proveniente da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos. É importante lembrar que os valores indicados são ilustrativos e referentes ao efeito médio global de todos os processos no balanço radiativo do planeta e podem variar significativamente de uma região para outra e de um período do ano para outro¹⁴.

¹⁴ HARRISON et al., 1993.

Os módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias têm sua eficiência baseada em um espectro de radiação solar de referência. O espectro padrão adotado atualmente é descrito na norma ASTM G173-03 proposta em 2003 pela *American Society for Testing and Materials*, hoje aceita mundialmente. Os parâmetros utilizados para gerar esse espectro foram baseados em características representativas para os 48 estados adjacentes dos Estados Unidos da América durante um período de um ano. O ângulo de inclinação selecionado é aproximadamente a latitude média para os Estados Unidos (latitudes 25,8 °N – 49,4 °N). Esse espectro solar foi desenvolvido com parâmetros atmosféricos distintos daqueles típicos para o Brasil e com valores médios de totais diários para a irradiação solar direta normal (DNI) na ordem de 6 kWh.m⁻². É importante mencionar que cerca de 1/3 do território brasileiro apresenta médias diárias da irradiação solar direta normal superiores a esse valor. Outro aspecto a ser considerado é que ele foi desenvolvido considerando condições de baixa concentração de aerossóis atmosféricos. Entretanto períodos de alta carga de aerossóis na atmosfera ocorrem sazonalmente no território brasileiro devido à queima da biomassa durante a estação seca entre os meses de maio a outubro.

A composição da atmosfera pode impactar de forma significativa no espectro de radiação solar incidente na superfície e, conseqüentemente, no desempenho de sistemas fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos são dispositivos espectralmente seletivos e, por isso, algumas regiões espectrais são aproveitadas de uma maneira mais eficiente que outras. A resposta espectral depende de características do semicondutor utilizado na fabricação dos módulos, por exemplo, o coeficiente de absorção, a largura da banda de proibida de energia (*bandgap*) etc. A Figura 3.4 ilustra a eficiência (ou resposta) espectral de diversos painéis fotovoltaicos comparados com o espectro ASTM, mas estudos têm mostrado que pode haver uma discrepância entre a eficiência nominal e real, para uma grande parte do território brasileiro em função das características típicas da atmosfera mencionados anteriormente.^{15,16}

¹⁵ NEVES, 2016.

¹⁶ NOBRE et al., 2016.

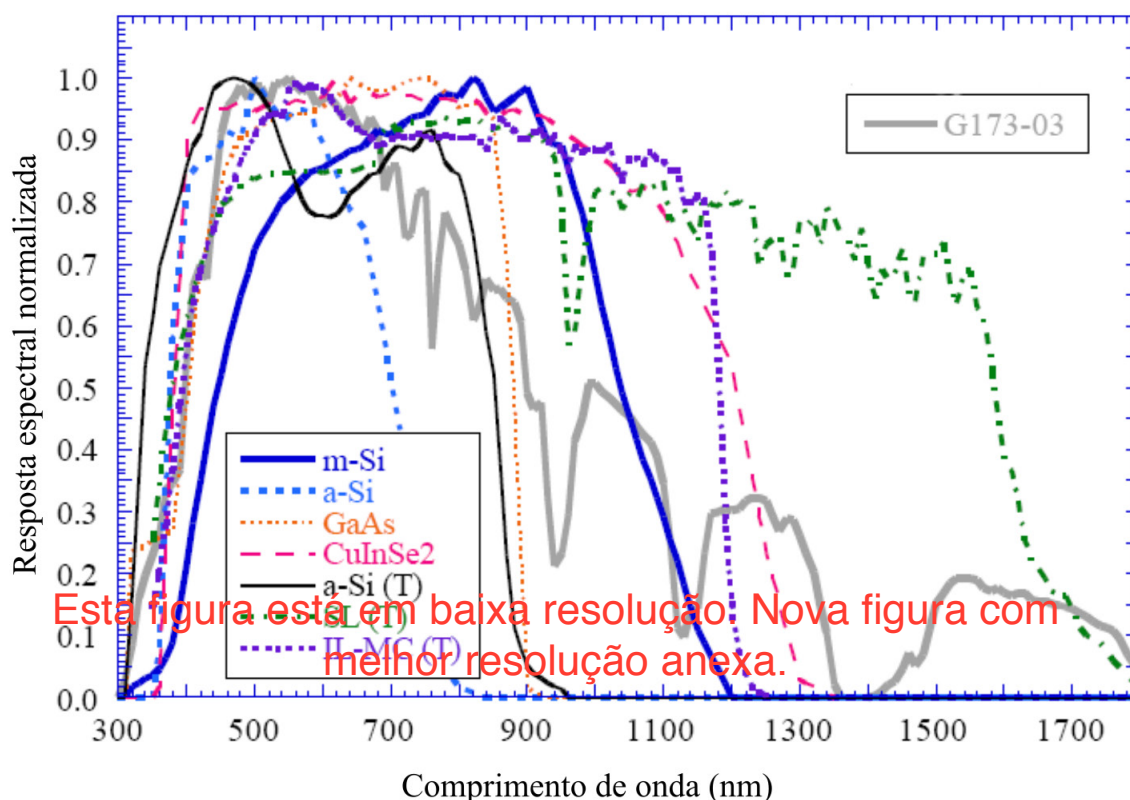


FIGURA 3.4 - RESPOSTAS ESPECTRAIS DE ALGUMAS TECNOLOGIAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMPARADOS COM O ESPECTRO-PADRÃO ASTM (G173-03)

A referência está errada, o correto é: Gueymard, C. A., 2007. "LATITUDE AND CLIMATE DEPENDENT OPTIMAL SITING AND SPECTRAL EFFECTS OF CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC OPTICS". Workshop on Concentrating Photovoltaic Optics and Power. Marburg, Alemanha.

3.2 TERMINOLOGIA E COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR

É importante definir alguns conceitos fundamentais antes de avançar no estudo sobre levantamento do recurso energético solar. A radiometria é o conjunto de técnicas empregadas para a coleta de dados relativos à radiação eletromagnética, incluindo sua interação com o meio físico seja ele sólido, gasoso ou líquido. A radiometria é empregada em sistemas de medição e de coleta de dados para realização de estudos de meteorologia e climatologia e, particularmente, em avaliação do recurso solar para especificações de sistemas de geração fotovoltaica ou centrais térmicas com concentração solar.

¹⁷ HAAG; KRENZINGER, 2010 Gueymard, 2007

As grandezas solarimétricas, descritas a seguir, referem-se a toda faixa do espectro de ondas curtas da radiação solar, desde a faixa do ultravioleta ao infravermelho próximo $-0,1 \mu\text{m}$ e $4,0 \mu\text{m}$. A nomenclatura adotada para cada uma dessas componentes pode variar na literatura técnico-científica daquela utilizada em normas técnicas para energia solar fotovoltaica¹⁸. Este livro segue a nomenclatura adotada em Duffie e Beckman¹⁹.

O primeiro conceito a destacar é a insolação, definida como o número de horas de céu claro, sem nuvens. Dessa forma, a insolação é uma grandeza medida em unidade de tempo (geralmente em horas) e não tem uma associação direta com a energia incidente na superfície. Por exemplo, a insolação em horário próximo ao nascer do Sol estará associada a uma quantidade de energia solar muito inferior a mesma insolação em horário próximo ao meio-dia solar.

Os termos irradiância solar e irradiação solar também costumam causar algumas dificuldades. A irradiância solar é a taxa de energia solar ou a potência (em J/s ou Watts) que incide sobre uma superfície por unidade de área. Dessa forma, a irradiância solar tem W/m^2 como unidades no SI. A simbologia que adotaremos para sua representação será a letra G .

A irradiação solar é a quantidade de energia radiante (em J) que incide sobre uma superfície por unidade de área. É numericamente igual à integração da irradiância solar ao longo do intervalo de tempo. Sua unidade de medida no SI é J/m^2 , mas tem sido usualmente expressa em Wh/m^2 (Watts-hora/ m^2) no setor de geração de energia. Será representada pelos símbolos H para irradiação diária ou I para a irradiação horária; ou seja, as integrais da irradiância nos períodos de 24 horas ou de uma hora, respectivamente. A Tabela 3.2 apresenta de forma resumida as grandezas solarimétricas utilizadas para quantificar a quantidade de energia solar incidente na superfície da Terra.

¹⁸ Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

¹⁹ DUFFIE; BECKMAN, 2013.

TABELA 3.2 - PRINCIPAIS GRANDEZAS SOLARIMÉTRICAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

GRANDEZA	SÍMBOLO	UNIDADE (SI)	CONCEITO
<i>Irradiância</i>	G	W/m^2	Fluxo incidente de energia ou potência radiante por unidade de área.
<i>Irradiação</i>	H ou I	J/m^2	Integração da irradiância ao longo do intervalo de tempo (H usado para valores diários e I para valores horários).

FONTE: Os autores.

Tanto a irradiância quanto a irradiação solar podem ser classificadas com base nos processos radiativos na atmosfera em componentes Global, Direta e Difusa; ou com base na superfície de incidência em Plano Inclinado, Plano Horizontal e Extraterrestre. Para distinguir entre essas componentes, utilizam-se os índices subscritos – “dir” para a componente direta, “dif” para a componente difusa, “0” para a incidência no plano horizontal extraterrestre, “i” para a incidência no plano inclinado. A ausência dos subscritos é adotada para representar a irradiância ou irradiação global incidente no plano horizontal. A Figura 3.5 mostra uma representação gráfica das componentes da irradiância solar definidas como segue abaixo:

- Irradiância extraterrestre (G_0): é a irradiância solar incidente em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou TOA;
- Irradiância difusa (G_{dif}): é a irradiância solar incidente sobre uma superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens etc.);
- Irradiância direta normal (G_n): também conhecida como DNI, é a irradiância proveniente diretamente do Sol que incide na direção normal sobre uma superfície sem sofrer nenhum espalhamento durante o seu percurso na atmosfera;
- Irradiância direta (G_{dir}): é a parcela da irradiância solar direta incidente perpendicularmente a uma superfície horizontal,

sendo determinada como o produto entre a irradiância direta normal e o cosseno do ângulo zenital solar (θ_z);

- Irradiância global horizontal (G): é a irradiância solar total incidente numa superfície horizontal, constituída pelo somatório das irradiâncias solar direta e difusa, ou seja, $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$;
- Irradiância no plano inclinado (G_i): é a taxa de energia total, por unidade de área, incidente sobre um plano inclinado em relação à superfície da Terra. Em geral, essa nomenclatura é adotada para descrever a irradiância solar em plano com ângulo de inclinação igual ao da latitude local e face voltada para o Norte (ou Sul) geográfico no Hemisfério Sul (ou Norte).

A fotometria é o equivalente à radiometria, mas se refere especificamente à aplicação em sistemas óticos, particularmente o olho humano e dos animais em geral. Na fotometria, é necessário que se conheça a curva de resposta do olho ou do sistema ótico aos diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética. A iluminância, principal grandeza da fotometria, é dada pela convolução entre a irradiância espectral e a curva de resposta espectral do sistema ótico, R (que pode ser o olho humano):

$$E = \int G(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.11)$$

Embora não tenha aplicações direta área de geração solar, a fotometria possui enorme importância na otimização de sistemas de iluminação uma vez que está associada à quantidade de luminosidade numa dada área de acordo com a curva de resposta padrão do olho humano. A informação sobre luminosidade produzida pela radiação solar apresenta relevância em estudos de impactos na segurança e na economia de energia elétrica. A fotometria contribui, por exemplo, no estabelecimento de horários para acionamento e desligamento do sistema de iluminação pública nos crepúsculos matutino e vespertino.

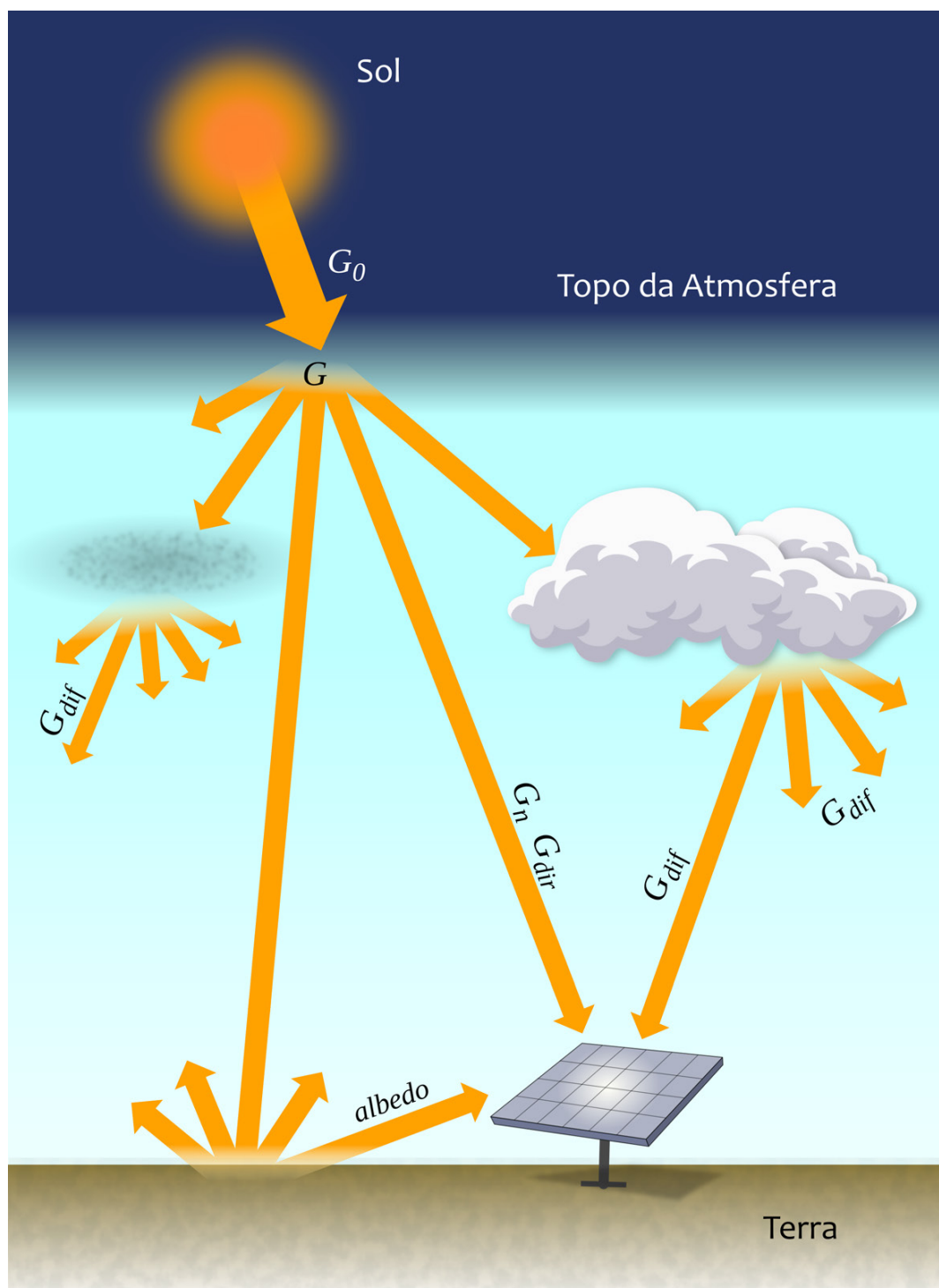


FIGURA 3.5 - COMPONENTES DA IRRADIÂNCIA SOLAR TOMANDO COMO BASE OS PROCESSOS RADIATIVOS NO SISTEMA TERRA/ATMOSFERA
FONTE: Os autores.

A unidade fotométrica equivalente à potência (W) de uma fonte luminosa é o Lumen (Lm). Já o equivalente à irradiância solar

(W.m^{-2}) é o Lux (Lm.m^{-2}). O limite de sensibilidade para o olho humano padrão é de aproximadamente 10 Lux; mas a visão em cores, propriamente dita (não a penumbra), inicia-se a partir de 1 kLux ²⁰. A norma técnica ABNT-NBR5101²¹ estabelece os requisitos para iluminação de vias públicas com o intuito de propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e de veículos. Os valores indicados estão entre 20 e 40 Lux dependendo da classe de uso da via ou local público. Para que se tenha uma ideia clara do que representam tais valores, pode-se indicar que tanto a alvorada como o ocaso (borda solar no horizonte) corresponde a 753 Lux. A iluminância (E), em Lux, pode ser calculada para alturas solares entre 0 e -18° pela expressão empírica:

$$E = 1835 \cdot \exp(1.0694 \cdot \alpha) \quad (3.12)$$

onde α é a elevação solar (em graus) conforme definido na equação (2.11); valores negativos são utilizados para indicar que o Sol está abaixo da linha do horizonte (vide Capítulo 2).

²⁰ Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

²¹ Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Os capítulos anteriores mostraram que a radiação solar incidente na superfície terrestre varia por conta de diversos fatores: o ciclo solar de 11 anos, o ciclo das estações do ano e o ciclo diário associados aos movimentos da Terra em torno do Sol, a variabilidade climática e fatores atmosféricos, tais como nuvens, aerossóis e gases emitidos em eventos naturais (como vulcões) e em atividades antrópicas etc. Dessa forma, a instrumentação a ser empregada para aquisição de dados de campo deve ter sensibilidade para detectar todas essas variabilidades. Ademais, deve ter uma estabilidade temporal não superior a menor variabilidade que se deseja medir. Os sensores modernos, utilizados para aquisição de dados de radiação solar, avaliam o parâmetro físico medido por meio de um sinal elétrico. Para tanto, os parâmetros associados à radiação solar podem ser convertidos através de diferentes processos físicos, conforme ilustra a Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - PRINCIPAIS PROCESSOS FÍSICOS EM QUE SE BASEIAM SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR

Categoria	Processo de medida	Sensores
Indireto	Duração do brilho solar (insolação)	Heliógrafo
Mecânico	Termopar	Actinógrafo
Térmico	Termopilha	Piranômetro
		Pirheliômetro
		Pirgeômetro
Elétrico	Efeito fotoelétrico	Luxímetro
		Fotodiodo
		Medidor Quantum
		Câmeras fotográficas
Ótico	Conversão de radiação UV através de elementos fluorescentes	Radiômetro GUV
Molecular	Reação química em emulsões	Papel fotográfico

FONTE: Os autores.

A aquisição de dados de irradiância (W.m^{-2}) e/ou irradiação (J.m^{-2}) solar são realizadas desde muitas dezenas de anos atrás. É importante ressaltar aqui que, diferente de unidades básicas de medida utilizadas no SI, tais como o metro e o quilograma, não há um padrão de referência primário para a radiação solar. Como consequência, a “calibração” de sensores de radiação solar é um tema desafiador e, em geral, as metodologias consolidadas utilizam o próprio Sol, como fonte de referência.

As séries históricas de observações realizadas em diversas localidades ao redor do planeta constituem uma base de dados muito importante para estudos da variabilidade da radiação solar em estudos de climatologia e aplicações em outras áreas de conhecimento. Essas bases de dados possibilitam o desenvolvimento de estudos e avaliações sobre tendências e variabilidade estatística da radiação solar incidente na superfície da Terra e, portanto, geram informações que podem ser indicadores importantes para desenvolvimento e elaboração de projetos de aproveitamento do recurso solar.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica estabelece requisitos de coleta de dados de campo para credenciamento de pro-

jetos de geração fotovoltaica ou geração solar térmica com o intuito de certificar a energia elétrica a ser produzida após a implantação da planta de geração solar²². Esses requisitos determinam o período mínimo de aquisição de dados, o tempo máximo de falhas na aquisição de dados, as incertezas máximas aceitáveis para o projeto e o padrão de qualidade de equipamentos e dos dados observados. Em geral, os requisitos mais fundamentais demandam que a instrumentação utilizada para a coleta de dados de campo seja capaz de medir variações de irradiância com incertezas inferiores a 3%, o tempo de aquisição de dados deve ser, no mínimo, de um ano para aplicações sem concentradores de energia solar e os períodos de falhas não devem ser superiores a quinze dias consecutivos.

As séries históricas de dados também possibilitam o desenvolvimento de metodologias numéricas para geração de séries sintéticas de dados que visam a preencher lacunas de informação observadas em campo por falha de equipamento ou por indisponibilidade de coleta de dados no local de interesse. Além disso, as séries históricas são essenciais para o desenvolvimento e validação de metodologias de modelagem computacional para estimativa e previsão do recurso solar.

Este capítulo contempla uma exposição dos principais instrumentos de medida, existentes no passado e na atualidade, com suas principais características técnicas. Em seguida, serão abordadas as boas práticas para a realização de medições solarimétricas com o intuito de garantir qualidade técnica para a base de dados gerada. A instrumentação aqui apresentada inclui equipamentos que já não são mais empregados, mas registraram dados para séries históricas que, ainda hoje, estão disponíveis publicamente com grande valor científico. Em seguida, são apresentados e discutidos os equipamentos empregados atualmente nas modernas estações de coleta de dados meteorológicos, ambientais e solarimétricos.

²² Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

4.1 HELIÓGRAFO DE CAMPBELL-STOKES

O Heliógrafo de Campbell-Stokes foi inventado em 1853 e, por isso, conta com a maior série histórica de insolação já registrada. Esse instrumento, mostrado na Figura 4.1, não fornece dados de irradiação ou irradiância solar, mas sim de horas de insolação, ou seja, horas de brilho solar direto. O equipamento é constituído de uma esfera de vidro maciço de uns 10 cm de diâmetro que funciona como uma lente convergente e concentra a radiação solar sobre uma posição em que uma cinta graduada é colocada. À medida que o Sol movimenta-se, a radiação solar é concentrada e provoca a queima da cinta registrando o número de horas de brilho solar. As cintas apresentam formatos diferentes para as estações do ano em razão da variação sazonal do percurso do Sol na abóbada celeste. A inclinação do eixo do heliógrafo precisa ser ajustada conforme a latitude do local e deve permanecer apontado sempre com o eixo inferior para o norte no Hemisfério Sul. No Brasil, há séries históricas que remontam quase 100 anos disponíveis para acesso público no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa²³.

Com base no número de horas insolação ($\bar{n}$) obtido pela marca deixada nas cintas graduadas, pode-se estimar a média mensal do total diário de irradiação solar fazendo uso de equações empíricas publicadas na literatura técnico-científica²⁴. A equação (4.1) apresenta uma formulação para estimativa da média mensal total diário de irradiação solar ($\bar{H}$) onde é necessário conhecer o fotoperíodo representado por N_d definido no capítulo 2, equação (2.13). Os coeficientes a e b são determinados numericamente para cada local de observação em razão de especificidades relacionadas à composição atmosférica, nebulosidade típica e concentração climatológica de aerossóis etc.

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \left\{ a + b \left(\frac{\bar{n}}{N_d} \right) \right\} \quad (4.1)$$

²³ Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

²⁴ IQBAL, 1983.



FIGURA 4.1 - HELIÓGRAFO DE CAMPBELL-STOKES

FONTE: Desconhecida

As incertezas das séries de irradiação solar obtidas com este instrumento são grandes, em geral superiores a 20%, principalmente devido a fatores que influenciam a queima da cinta com a umidade do ar. Sob condições muito úmidas, a queima pode não começar até que a irradiância atinja valores da ordem de 280 W.m^{-2} . Por outro lado, em clima muito seco, a queima pode ocorrer a partir de 70 W.m^{-2} . Por essa razão, esse instrumento não deve ser empregado em levantamento de dados para projetos solares. Porém a enorme série histórica de dados disponíveis pode ser empregada nos estudos sobre variabilidade de longo período, ou decadal, do recurso solar.

4.2 ACTINÓGRAFO

O actinógrafo é um pouco mais moderno, inventado em 1911 e, da mesma forma que o heliógrafo, foi amplamente empregado em estações meteorológicas. Trata-se de um instrumento usado para medir a irradiância global, composto de sensores baseados na deformação por expansão-contração térmica de um par bimetálico. O par bimetálico é

formado pela união de dois metais de diferentes coeficientes de dilatação, o que resulta em uma deformação proporcional a temperatura. O sinal produzido pelos sensores é utilizado para comandar o movimento de uma pena que registra o valor instantâneo da irradiância solar em um papel graduado e enrolado sobre um cilindro rotatório. As incertezas das medidas realizadas são elevadas e encontra-se na faixa de 15 a 20%. Em razão desse fato, o actinógrafo é considerado atualmente um instrumento de terceira classe. No entanto a base de dados históricos provida por esse tipo de instrumento estende-se a mais de 30 anos no Brasil, daí sua importância nos estudos sobre variabilidade decadal do recurso solar. Os primeiros mapeamentos solares publicados com dados para o Brasil foram elaborados a partir do uso da base de dados históricos coletados majoritariamente por actinógrafos e heliógrafos^{25,26}.



FIGURA 4.2 - ACTINÓGRAFO EM OPERAÇÃO NAS INSTALAÇÕES DO INPE
FONTE: Os autores (2018).

²⁵ TIBA, 2000.

²⁶ Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1988.

4.3 PIRANÔMETROS

Os piranômetros são, conforme definido pela norma internacional ISO 9060, instrumentos para a medição da irradiância solar hemisférica (global) em uma faixa espectral de 300 a 3.000 nm. Essa faixa também compreende a radiação visível e parte da radiação ultravioleta e infravermelha. De acordo com a ISO 9060²⁷, os piranômetros estão classificados em função de sua precisão em três categorias: Padrão Secundário; Primeira Classe e Segunda Classe.

Os piranômetros de segunda classe e primeira classe são projetados para aplicações de campo em levantamento do recurso solar e em redes de monitoramento de aplicação geral, em que se busca um equilíbrio entre especificações técnicas e custo. Os instrumentos da categoria de padrão secundário são normalmente utilizados em situações em que há requisito para dados de alta precisão como estações de monitoramento científico para pesquisa climática e para o desenvolvimento e validação de modelos radiativos. Um exemplo desse último é a rede BSRN (*Baseline Surface Radiation Network* - <http://bsrn.awi.de/>). Os instrumentos de padrão secundário também são frequentemente utilizados como referência para calibração de outros piranômetros em laboratórios e institutos de pesquisa.

4.3.1 Piranômetros termoeletrônicos

Um piranômetro que utiliza pares termoeletrônicos como elemento sensor é denominado de piranômetro de termopilha (vide Figura 4.3). A termopilha é uma junção entre dois metais diferentes que produz uma tensão proporcional à diferença de temperatura relacionada à irradiância solar incidente. Nos piranômetros tipo preto e branco, o elemento sensor é revestido com uma tinta especial de forma que as junções quentes estão localizadas sob os segmentos pintados de preto e as frias estão sob os segmentos brancos. Tais

²⁷ International Standards Organization, 1990.

piranômetros dominaram o mercado por muitos anos; porém, devido ao fato de possuírem menor estabilidade, resultando na necessidade de calibrações periódicas e frequentes, foram substituídos por concepções mais modernas nas quais a superfície receptora é totalmente pintada de negro para máxima absorção da radiação incidente.

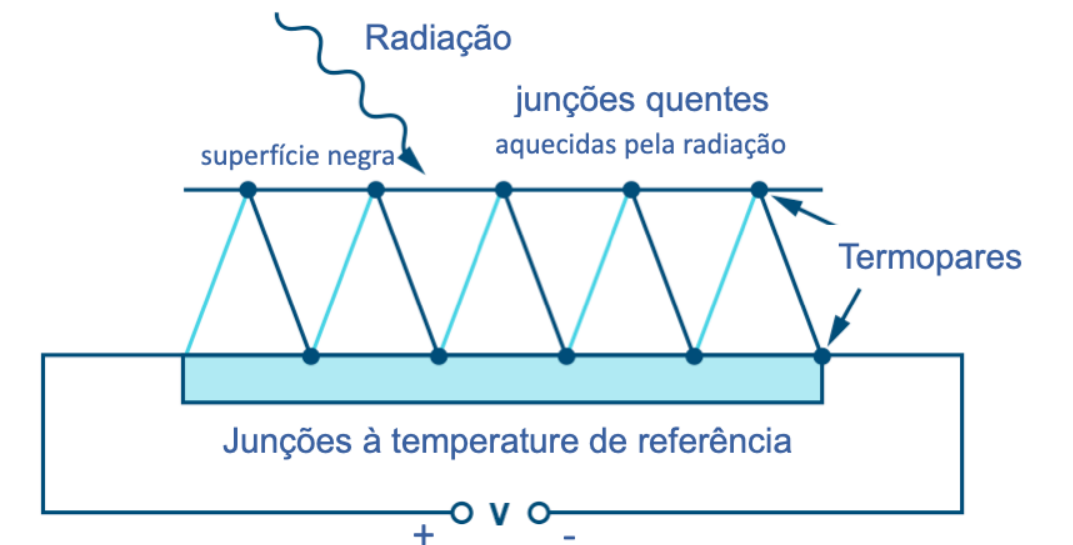


FIGURA 4.3 - ILUSTRAÇÃO DE UM SENSOR DE TERMOPILHA E SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

FONTE: Os autores.

Outra tecnologia termoelétrica importante nos instrumentos mais modernos para aquisição de dados de radiação solar baseia-se no efeito Peltier. Quando exposto à radiação solar, o sensor gera uma pequena tensão proporcional à diferença de temperatura entre a superfície de absorção, pintada totalmente de preto, e o corpo do instrumento. Os piranômetros de alta qualidade com essa tecnologia possuem componentes de compensação passiva de temperatura interna para corrigir as mudanças na sensibilidade do elemento sensor com variações na temperatura ambiente. Alguns possuem, também, a opção de amplificação embutida para adequar-se aos sistemas de aquisição de dados que não trabalham com níveis de sinal muito baixos, ou em situações em que há necessidade de uso de

cabos longos (maiores que 100 m de comprimento). Os instrumentos mais recentes apresentam a opção da conversão analógica/digital do sinal por meio de microprocessadores internos de modo que podem fornecer comunicação serial de dados em longas distâncias e executar correção dos dados observados em função de temperatura.

A termopilha presente nos piranômetros é protegida por uma cúpula de quartzo ou de vidro especial, a fim de minimizar as influências externas do clima e da sujeira. O elemento sensor recebe a radiação global em uma faixa espectral determinada pela transmitância espectral da(s) cúpula(s) e pelo fator de absorção da superfície do receptor pintada de negro. Nesse processo, a cúpula também é aquecida pela radiação de entrada e, portanto, emite radiação térmica para o receptor, o que cria um sinal “falso”, denominado desvio do zero (do Inglês “zero offset”). A maior parte dos piranômetros é equipada com duas cúpulas para minimizar esse efeito.

A Figura 4.4 ilustra um piranômetro típico destacando as partes principais. É composto pelo sensor termopilha (1); por dois domos de vidro com baixo teor de ferro colocados externamente (2) e internamente (3) para garantir isolamento térmico da termopilha; uma blindagem metálica branca (4) num formato que evite a incidência da radiação do albedo na termopilha; o corpo do equipamento que pode possuir ou não um sensor de temperatura acoplado (5); o conector que leva o sinal elétrico gerado pela termopilha ao sistema de coleta de dados (6); um parafuso de ajuste para nivelamento do conjunto (7); elemento fixador do equipamento à uma base ou plataforma da estação de coleta de dados (8); um nível de bolha para ajuste de nivelamento do equipamento (9) e um sistema dissecador que deve ser trocado periodicamente (10). O conjunto pode ser dotado de um ventilador (e/ou de um aquecedor), destinado a manter a temperatura do conjunto estável ao longo do dia.

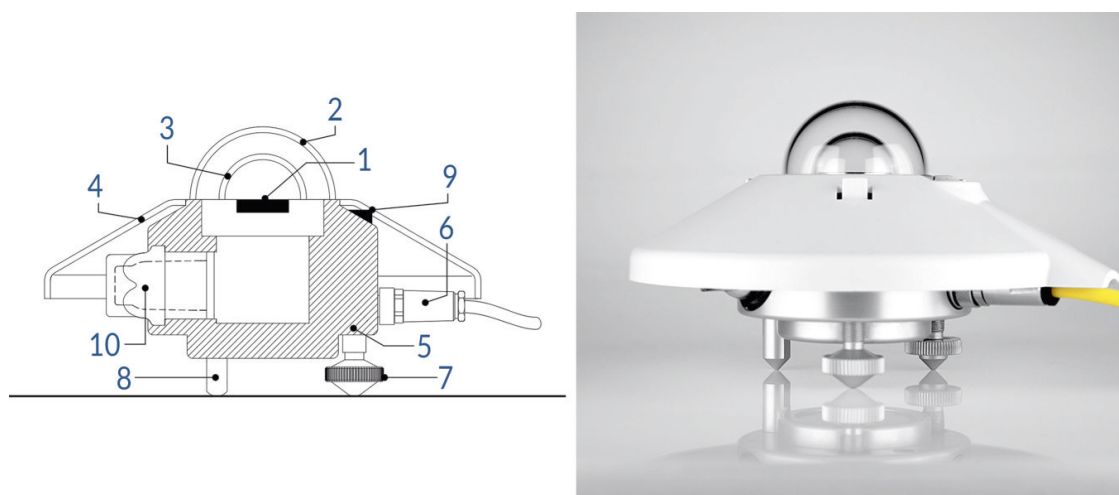


FIGURA 4.4 - IMAGEM DE UM PIRANÔMETRO DE TERMOPILHA E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE SEUS COMPONENTES: SENSOR (1); DOMOS TRANSPARENTES DE PROTEÇÃO (2) E (3); BLINDAGEM (4); CORPO (5); (6) CONECTOR (6); PARAFUSO NIVELAMENTO (7); SUPORTE (8); NÍVEL DE BOLHA (9); DISSECADOR (10)

FONTE: Kipp e Zonen (2017).

O piranômetro de termopilha possui uma curva de resposta espectral praticamente plana entre $0,3$ e $50 \mu\text{m}$, que cobre todo o espectro de radiação solar. Atualmente, o piranômetro de termopilha constitui o sistema de maior acurácia para medir a radiação solar com desvios da ordem de um por cento. Uma característica importante para a qualidade da medida realizada por um piranômetro é a chamada “resposta direcional” ou “resposta de cosseno”. O formato dos domos de vidro possibilita uma resposta angular excelente no ângulo sólido de 180° . O termo “resposta de cosseno” está relacionado com o fato que, para fazer uma medição de irradiância, é exigido que a componente direta da radiação varie com o cosseno do ângulo de incidência. Isto é, a resposta do instrumento deve ser máxima quando a radiação solar incide na direção normal (90°) à superfície do sensor. Por outro lado, a resposta do sensor deve ser nula quando o Sol estiver no horizonte (0°) e deve ser a metade do valor máximo quando o ângulo incidência for de 60° . A Figura 4.5 ilustra como varia o desvio relativo máximos e mínimos de um bom

piranômetro. O desvio é mínimo para $\theta_z = 0$ (incidência normal ao sensor) e cresce à medida que se θ_z se aproxima de 90° .

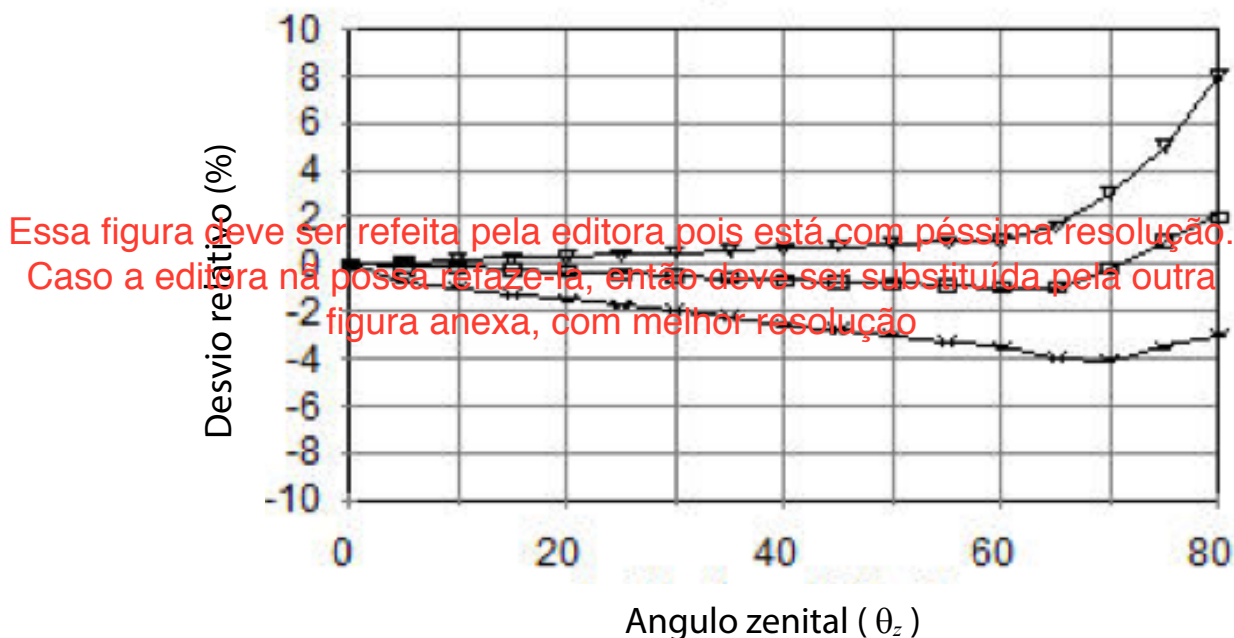


FIGURA 4.5 – CURVAS TÍPICAS ILUSTRANDO OS ERROS RELATIVOS DE RESPOSTA DE COSSENO DE PIRANÔMETROS DE BOA QUALIDADE.

FONTE: Os autores.

4.3.2 Piranômetros Semicondutores

O elemento sensor em um piranômetro semicondutor (Figura 4.6) é um fotodiodo que converte diretamente a radiação solar em energia elétrica por efeito fotoelétrico. A diferença de potencial gerada quando o fotodiodo está iluminado é convertida em uma corrente elétrica proporcional à irradiância solar incidente. Contudo tais equipamentos não apresentam resposta espectral plana conforme indicado na Figura 4.7. A não linearidade da resposta espectral é responsável por medidas de irradiância global com maiores incertezas em condições de maior nebulosidade. Incertezas na ordem de 5% podem ser encontradas em medidas de irradiância solar direta normal em situações de céu claro.

Além disso, os piranômetros semicondutores apresentam uma resposta de cosseno inferior aos piranômetros de termopilha e são mais sensíveis às flutuações rápidas por possuírem inércia térmica inferior. Por conta dessas características, os piranômetros semicondutores são considerados equipamentos de segunda classe. No entanto os piranômetros de fotodiodo são mais robustos e apresentam menor custo que os piranômetros de termopilha. Esse aspecto torna este instrumento atraente em certas aplicações para as quais os requisitos de precisão e acurácia não são restritivos. Em avaliações do potencial solarimétrico de uma região, piranômetros semicondutores podem ser considerados para aquisição de dados em uma etapa exploratória.

Vários tipos específicos de fotodiodos são usados em combinação com filtros ópticos para produzir uma resposta espectral personalizada. Como exemplo podemos citar o instrumento para aquisição de dados PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), faixa espectral da radiação solar utilizada pela vegetação no processo de fotossíntese), e os instrumentos para aquisição de Iluminância e de radiação ultravioleta (UV).

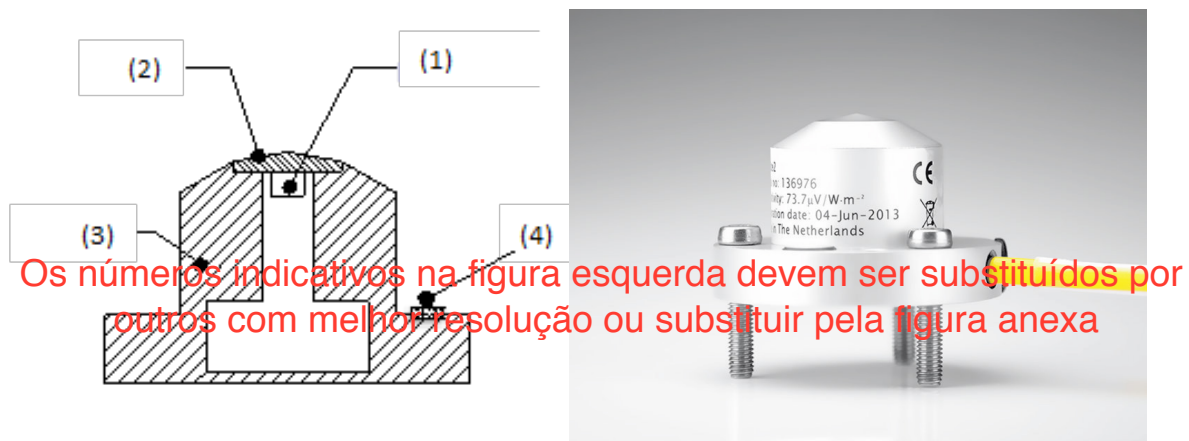


FIGURA 4.6 - IMAGEM DE UM PIRANÔMETRO SEMICONDUTOR E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE SEUS COMPONENTES: SENSOR (1); JANELA TRANSPARENTE DE PROTEÇÃO (2); BLINDAGEM E CORPO (3); NÍVEL DE BOLHA (4)

FONTE: Kipp e Zonen (2017).

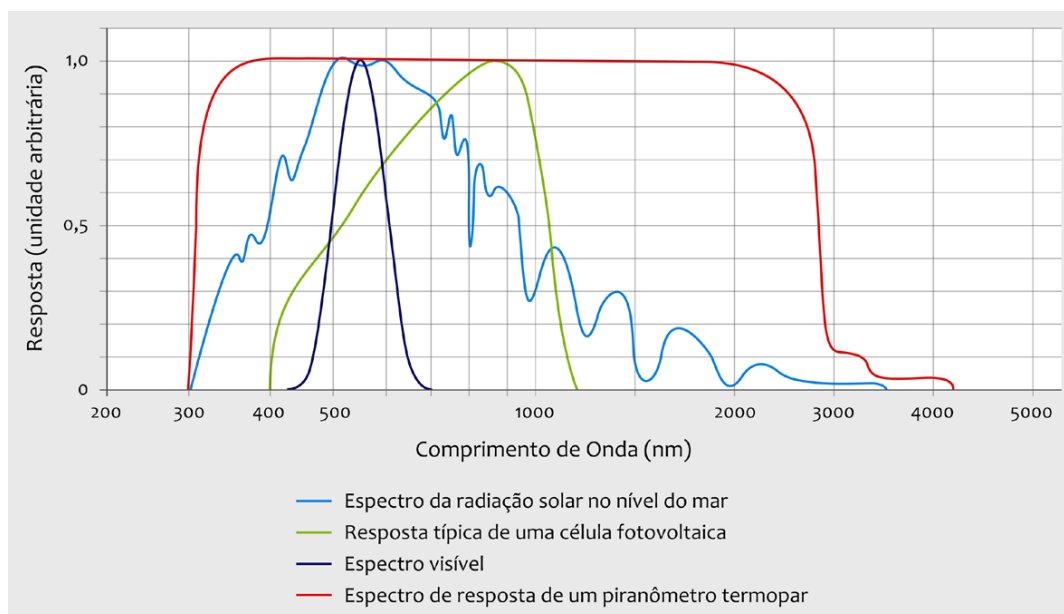


FIGURA 4.7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RESPOSTA DOS PIRANÔMETROS TERMOELÉTRICO E SEMICONDUTOR

FONTE: Os autores, Adaptado de Kipp e Zonen (2017).

4.4 PIRGEÔMETRO

O pirgeômetro é, na realidade, um piranômetro, não só na sua aparência externa como na sua concepção, e foi projetado para medir radiação eletromagnética em ondas longas, entre $4,5 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$. Essa banda espectral geralmente não apresenta interesse direto ao setor de geração solar, mas fornece informações relevantes para estudos científicos sobre o balanço radiativo da atmosfera e sobre o clima, com impacto indireto sobre o levantamento do recurso solar. O pirgeômetro também funciona com uma termopilha, contudo algumas características fundamentais diferenciam-no de um piranômetro. O domo é revestido de uma película depositada a vácuo que impede a transmissão de radiação em comprimentos de onda inferior a $4,5 \mu\text{m}$ de forma a evitar a incidência de radiação de ondas curtas sobre o elemento sensor. A Figura 4.8 apresenta um pirgeômetro e suas partes principais: (1) termopar; (2) janela atenuadora de ondas curtas; (3) sensor de temperatura do domo e da base; (4) blindagem metálica branca; (5) corpo do pirgeômetro;

(6) sistema dissecador que deve ser trocado periodicamente; (7) parafuso de ajuste para nivelamento do conjunto; (8) nível de bolha para nivelamento do equipamento.

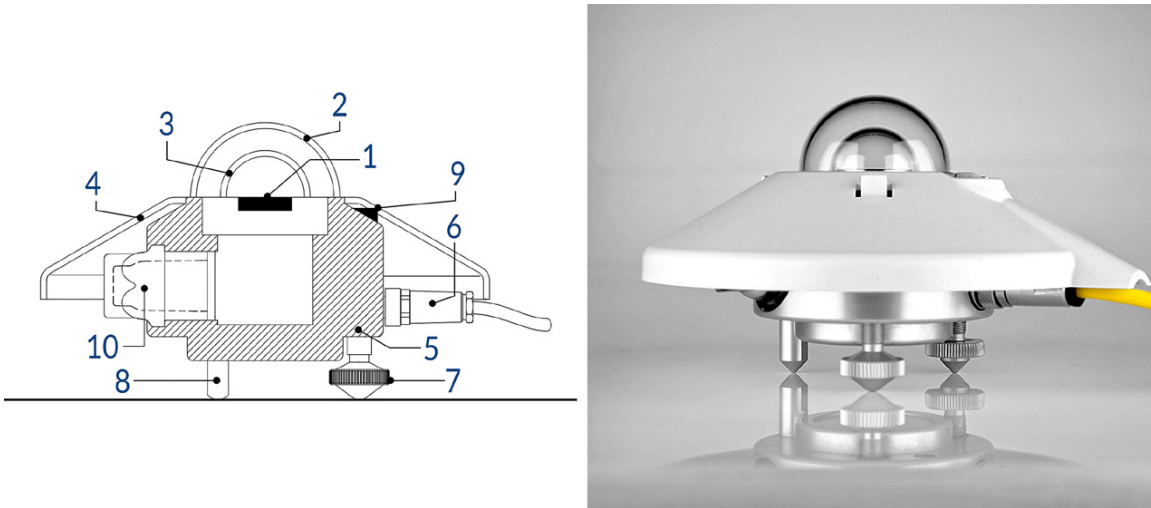


FIGURA 4.8 - IMAGEM DE UM PIRGEÔMETRO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE SEUS COMPONENTES: (1) TERMOPAR; (2) JANELA ATENUADORA DE ONDAS CURTAS; (3) SENSOR DE TEMPERATURA DO DOMO E DA BASE; (4) BLINDAGEM METÁLICA BRANCA; (5) CORPO DO PIRGEÔMETRO; (6) SISTEMA DISSECADOR; (7) PARAFUSO DE AJUSTE PARA NIVELAMENTO; (8) NÍVEL DE BOLHA

FONTE: Kipp e Zonen (2017).

Como opera na faixa do infravermelho, o pirgeômetro está sujeito à influência das diferenças de temperatura entre seus componentes e o ambiente externo. Para reduzir o impacto dessa influência do ambiente externo na incerteza das medidas realizadas, sua estrutura é projetada para proporcionar melhor isolamento térmico do sensor. Ademais, a determinação da irradiância de onda longa é mais complexa, uma vez que envolve a aplicação de correções das diferenças de temperatura entre o domo e o corpo do equipamento. A equação que fornece a irradiância em W/m^2 em um pirgeômetro que possui sensores de temperatura do domo e da base está apresentada em (4.2):

$$E(W / m^2) = \frac{V}{C} (1 + k_1 \sigma T_B^4) + k_2 \sigma T_B^4 + k_3 \sigma (T_D^4 - T_B^4) \quad (4.2)$$

onde V representa a voltagem de saída da termopilha; C é o coeficiente de calibração do sensor; T_B é a temperatura da base; T_D representa a temperatura do domo; σ é a constante de Stefan-Boltzmann e $k_{1,2,3}$ são constantes determinadas nos procedimentos de calibração do equipamento. Para os pirgeômetros que não possuem sensores de temperatura do domo, a equação 3.1 reduz-se a:

$$E(W / m^2) = \frac{V}{C} (\sigma T_B^4) \quad (4.3)$$

Normalmente, recomenda-se que os pirgeômetros sejam protegidos da radiação solar direta por um anel de sombreamento ou um ocultador acoplado em seguidor solar automático (serão descritos mais adiante) com o intuito de minimizar a influência do espectro de ondas curtas nos valores fornecidos pelo equipamento e reduzir desvios causados por emissões térmicas do próprio instrumento. No entanto alguns instrumentos possuem sistemas internos que compensam esses desvios de forma tão eficaz que não há ganho significativo ao sombrear a cúpula. O pirgeômetro apresenta acurácia da ordem de 2-3%.

4.5 PIRHELIÔMETRO

O pirheliômetro é um radiômetro que emprega o mesmo princípio de medida da luz solar de ondas curtas do piranômetro, porém é dotado de um colimador para que somente a componente direta normal da radiação solar (G_{dni}) consiga incidir no sensor de termopilha. O colimador possui um campo de visada padrão internacional com ângulo sólido igual a 5° . A Figura 4.9 apresenta uma descrição gráfica e uma imagem do equipamento. Geralmente, o equipamento apresenta uma curva de resposta espectral entre 0,2

a $4\ \mu\text{m}$ e, portanto, cobre o intervalo de ondas curtas. É constituído por um sensor de termopilha (1), uma janela plana de quartzo para proteger o detector e o interior do tubo (2); mira para ajuste de alinhamento com o feixe de radiação solar direta (3); corpo revestido internamente de tinta preto-fosca para evitar reflexões (4); colimadores (5).

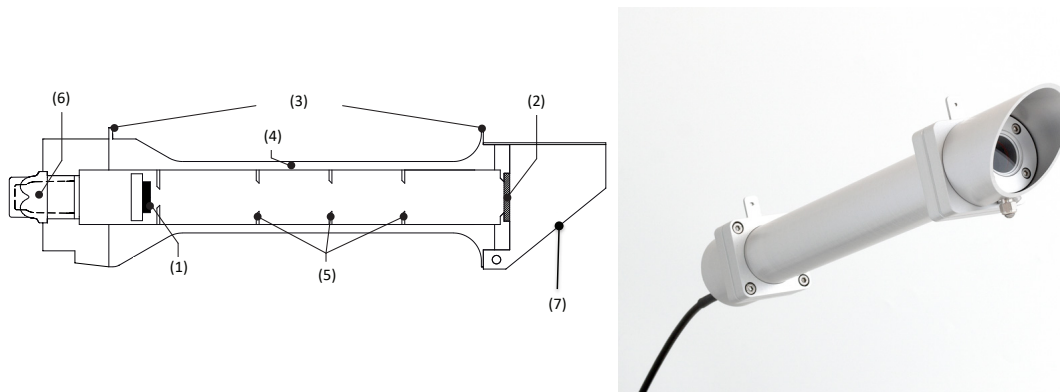


FIGURA 4.9 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E IMAGEM DE UM PIRHELIÔMETRO: SENSOR DE TERMOPILHA (1), JANELA PLANA DE QUARTZO PARA PROTEÇÃO DO DETECTOR E INTERIOR DO TUBO (2); MIRA PARA AJUSTE DE ALINHAMENTO COM O FEIXE DE RADIAÇÃO SOLAR DIRETA (3); CORPO REVESTIDO INTERNAMENTE DE TINTA PRETO-FOSCA PARA EVITAR REFLEXÕES (4); COLIMADORES (5) E CONECTORES (6)

FONTE: Kipp e Zonen (2017).

O pirheliômetro deve ser operado em conjunto com um sistema seguidor solar para que esteja sempre direcionado para o Sol. O seguidor solar é um sistema robotizado com um *firmware* interno que, uma vez posicionado corretamente com relação à direção Norte-geográfico e configurado com a posição geográfica e data/horário local, passa a seguir de forma automática a trajetória do Sol na abóboda celeste.

O sistema robótico é muito preciso, e alguns modelos do equipamento contam com um detector de Sol que permite o realinhamento automático do sistema seguidor, porém essa tecnologia só opera em condições de céu claro. O pirheliômetro possui, em

sua borda frontal, um pequeno orifício (indicador de alinhamento indicado na Figura 4.9) que projeta a luz solar sobre um ponto marcado na borda posterior do mesmo permitindo, desse modo, que o operador verifique se o equipamento está corretamente alinhado com a direção do feixe de irradiação direta com o intuito de minimizar as incertezas e, conseqüentemente, garantir a qualidade das observações realizadas.

4.6 SISTEMAS DE SOMBREAMENTO

A aquisição de dados da radiação solar difusa só pode ser realizada com a supressão do feixe de radiação solar direta. Também é aconselhável que a aquisição de dados da radiação de onda longa com uso de pirgeômetro adote o mesmo procedimento. Duas técnicas são comumente empregadas para sombrear os sensores: o anel de sombreamento e o seguidor solar com a esfera de sombreamento. Ambas estão ilustradas na Figura 4.10.



FIGURA 4.10 - SISTEMAS UTILIZADOS PARA SOMBREAMENTO DOS SENSORES EM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OU RADIAÇÃO DE ONDA LONGA: ANEL DE SOMBREAMENTO (A) E SEGUIDOR SOLAR DOTADO COM OCULTADORES ESFÉRICOS (B)

FONTE: Os autores.

O anel de sombreamento é um uma cinta circular ou semicircular que se adapta ao suporte do piranômetro de tal forma que durante a trajetória aparente do Sol na abóboda celeste a sombra do anel permanecerá sempre projetada exatamente sobre o elemento sensor. O anel deve ser ajustado periodicamente para compensar a variação sazonal da declinação solar ao longo do ano. Embora relativamente barato e simples, esse procedimento apresenta a desvantagem de reduzir a incidência da radiação solar difusa sobre o sensor. Contudo, diversos estudos publicados na literatura científica descrevem metodologias numéricas para correção das medidas para compensar tal efeito^{28, 29}.

O procedimento que faz uso da esfera de sombreamento com o seguidor solar é mais moderno, e dispendioso, porém tem menor impacto nas incertezas das medidas realizadas. A esfera pintada de negro fumo, acoplada ao seguidor solar permite projetar a sombra exatamente sobre o elemento sensor, evitando, assim, o problema relacionado com o encobrimento parcial do céu causado pelo anel de sombreamento. O seguidor solar possibilita o uso de múltiplas esferas para o sombreamento simultâneo de diversos radiômetros, tais como o piranômetro utilizado para medida de radiação difusa, o pirgeômetro utilizado para medida de radiação de onda longa. Além dos sensores destinados à coleta de dados das componentes da irradiação solar, outros equipamentos, tais como câmeras *all-sky* para imageamento do céu, também podem fazer uso do seguidor solar.

4.7 RADIÔMETRO DE BANDA ROTATIVA (ROTATING SHADOW BAND)

Os radiômetros de banda rotativa são usados frequentemente para aquisição de dados do recurso solar em locais remotos devido a sua robustez, seu baixo consumo de energia e custo reduzido em

²⁸ ABREU et al., 1999.

²⁹ DEHNE, 1984.

contraste com conjuntos de pirheliômetros e sistemas que utilizam o seguidor solar. A Figura 4.11 mostra a imagem e uma descrição esquemática de um instrumento. O equipamento utiliza um piranômetro semiconductor (fotodiodo) e, portanto, apresenta as desvantagens já discutidas anteriormente para piranômetros semicondutores. Um motor de passo gira uma banda de sombreamento (ilustrado em (2) na Figura 4.11) de forma a se obter alternadamente medidas da irradiância solar global horizontal e irradiância difusa. A componente direta da irradiância solar (G_{dni}) é determinada por subtração e levando-se em conta o ângulo zenital solar.

Devido às limitações do piranômetro semiconductor e à menor frequência de amostragem do radiômetro de banda rotativa (1 minuto), as medidas de G_{dni} são superestimadas em cerca de 5% em episódios de céu claro.

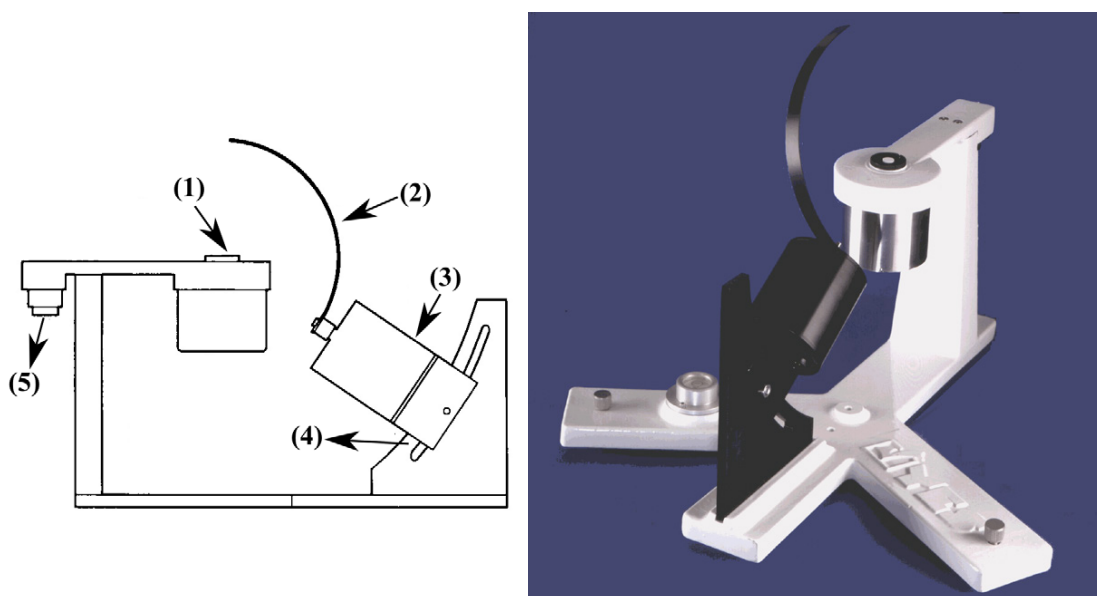


FIGURA 4.11 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO E IMAGEM DE UM RADIÔMETRO DE BANDA ROTATIVA: SENSOR SEMICONDUTOR (1), BANDA DE SOMBREAMENTO (2), MOTOR DE PASSO (3), AJUSTE PARA LATITUDE LOCAL (4) E SAÍDA DE CONEXÃO (5)

FONTE: Adaptação de Yankee Environmental Systems (2018).

4.8 ESPECTRÔMETRO ÓTICO

Um espectrômetro óptico é um instrumento usado para medir a intensidade da radiação eletromagnética num intervalo específico de comprimento de ondas. Como foi visto no Capítulo 3, a radiação solar que incide sobre a superfície da Terra cobre uma faixa bastante extensa do espectro solar que vai de 200 a 4000 nm. O uso desse instrumento para a aquisição de dados vem se tornando importante em razão dos resultados de pesquisas recentes^{30, 31, 32, 33} que demonstram as significativas variações espectrais da irradiação solar incidente decorrentes da influência das condições atmosféricas e meteorológicas como a concentração de poluentes atmosféricos, incluindo aerossóis emitidos em eventos de queimadas em áreas rurais.

Para que possam ser comercializados, os módulos fotovoltaicos devem ser certificados sob condições padrões, conhecidas como STC (do inglês *Standard Test Conditions*), estabelecidas em normatizações nacional e internacional como IEC 60904-3, ASTM G173-03 ou ABNT NBR 10899 – irradiância solar igual 1000 W/m², temperatura de célula fotovoltaica em 25°C e espectro da radiação solar global sob condição de massa de ar igual 1,5 (chamado de espectro AM 1.5 G). Apesar de padronizar o procedimento de avaliação das especificações técnicas de painéis fotovoltaicos e possibilitar uma análise comparativa entre as diversas tecnologias e modelos, as condições do STC não são representativas das condições ambientais a que os mesmos serão expostos durante seu ciclo de uso numa planta de geração solar. O espectrômetro óptico pode ser bastante útil quando empregado para avaliar o rendimento dos painéis fotovoltaicos fora das condições STC. A Figura 4.12 permite a comparação do espectro de radiação solar incidente na superfície observado por um espectrômetro em duas condições atmosféricas distintas: céu claro

³⁰ ISHII et al., 2013.

³¹ DIRNBERGER et al., 2015.

³² NOBRE et al., 2016.

³³ NEVES et al., 2018.

com baixa concentração de aerossóis atmosféricos (curva em tom de cinza mais escuro) e de céu claro com elevada concentração de aerossóis (curva em tom de cinza claro).

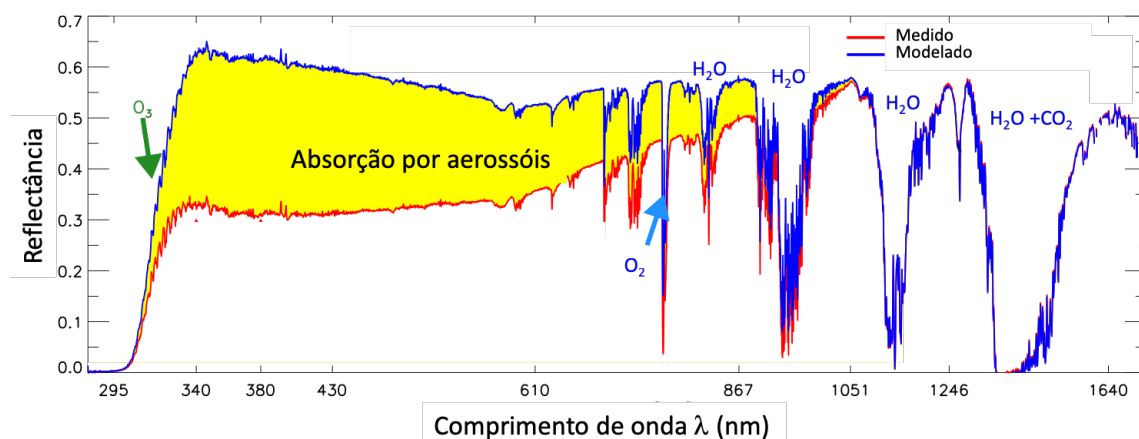


FIGURA 4.12 - EXEMPLO DE ABSORÇÃO POR AEROSSOL DURANTE O EXPERIMENTO REALIZADO EM 2006 QUANDO UMA ELEVADA CARGA DE AEROSSÓIS ESTEVE PRESENTE SOBRE O ATLÂNTICO SUL A OESTE DA ÁFRICA. A FIGURA ILUSTRA TAMBÉM AS PRINCIPAIS BANDAS DE ABSORÇÃO DO VAPOR D'ÁGUA

FONTE: Modificado de Graaf1 et al. 2013.

4.9 FOTÔMETRO SOLAR

O fotômetro solar permite obter informações sobre a profundidade ótica e distribuição de tamanho dos aerossóis atmosféricos (AOT) e sobre a quantidade de água precipitável na coluna atmosférica. O fotômetro solar é, na realidade, uma adaptação do pirheliômetro, mas com a diferença de que utiliza filtros para aquisição de dados em diversas faixas do espectro solar em que ocorrem processos de interação da radiação solar com aerossóis e vapor d'água.



FIGURA 4.13 - FOTÔMETRO SOLAR INSTALADO JUNTO A ESTAÇÃO SONDA DO INPE, EM SÃO MARTINHO DA SERRA, RS

FONTE: Os autores.

A profundidade ótica dos aerossóis na coluna atmosférica é obtida a partir de equação de Beer-Lambert-Bouger descrita na equação (4.4) onde V é a voltagem fornecida pelo sensor operando em um dado comprimento de onda, V_o é a voltagem correspondente à radiação solar extraterrestre (estimada por método empírico), $(d_m/d)^2$ é a correção de excentricidade, m é a massa ótica (ou comprimento ótico) e $\tau(\lambda)$ é a profundidade ótica total que deve ser subtraída das outras componentes para se obter a profundidade ótica dos aerossóis (τ_a). A distribuição de tamanho dos aerossóis atmosféricos é obtida a partir do parâmetro de Angstrom α , normalmente empregando as observações realizadas nos comprimentos de onda 440nm e 870nm conforme descrito na equação (4.5) onde τ_a é a transmitância dos aerossóis atmosféricos. Valores de α superiores a 2,0 indicam a presença de partículas de moda fina (com diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$)

geralmente emitidas na combustão, presentes na fumaça e sulfatos. Valores próximos de zero indicam a presença de partículas de moda grossa como poeira, pólen, sal marinho, entre outros.

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \exp[-r(\lambda)m] \quad (4.4)$$

$$\alpha = \frac{d \left(\ln \left(\tau_a(\lambda_{870}) / \tau_a(\lambda_{440}) \right) \right)}{d \left(\ln \left[(\lambda_{870}) / (\lambda_{440}) \right] \right)} \quad (4.5)$$

A quantidade total de água precipitável na coluna atmosférica é medida mediante relações entre as transmitâncias em três comprimentos de onda da radiação solar. Primeiro, a transmitância total na atmosfera é calculada utilizando-se os comprimentos de onda λ de 675 nm e 870 nm. Em seguida, a transmitância em 940 nm, comprimento de onda em que ocorre uma grande atenuação da radiação solar devido ao vapor d'água, é estimada e subtraída da transmitância total fornecendo a transmitância do vapor d'água. A partir disso, é calculada a quantidade de água precipitável na coluna atmosférica³⁴.

4.10 IMAGEADOR DO CÉU

Existem duas formas básicas para obtenção de dados de nebulosidade (ou fração de cobertura de nuvens) e sua classificação a partir da superfície terrestre: por meio da inspeção visual realizada por observadores e por meio do uso de imageadores do céu.

Usualmente, a observação da cobertura de nuvens é realizada por meio da inspeção visual do céu por técnicos treinados que trabalham em estações meteorológicas, conforme padrões definidos pela WMO. No procedimento usado durante a observação, o técnico responsável deve colocar-se num ponto que ofereça a mínima obstrução da visão do céu em todas as direções. A estimativa deve ser realizada supondo-se que a nebulosidade existente esteja distribuída em uma só camada

³⁴ CERQUEIRA JR et al., 2014.

contínua. A quantidade parcial ou total de nuvens é expressa por uma fração proporcional à área encoberta e com aproximações em oitavos (ou octas) ou décimos. Quando a quantidade de nuvens for grande, torna-se mais fácil estimar a área sem nebulosidade e, por diferença, obter a área encoberta por nuvens. É recomendado ignorar a parte do céu próximo ao horizonte, pois nessa região as nuvens aparentam estar mais agrupadas e, em função do efeito de perspectiva, o total de nuvens aparenta ser superior ao valor real. Se existir mais de uma camada de nuvens presente no momento da observação, somente a porção visível de cada uma deve ser considerada. Nas ocasiões de nevoeiros densos, o estado do céu deve ser retratado como completamente nublado (8 octas). Caso o Sol ou as estrelas possam ser vistos através do nevoeiro e não haja nenhuma evidência de nuvem acima dele, a fração de cobertura a ser registrada deve ser nula. Percebe-se que a observação visual realizada por técnicos em superfície, embora amplamente aceita, possui um caráter bastante subjetivo.

Para superar a subjetividade, além de permitir um estudo da variabilidade temporal da cobertura de nuvens em escala de tempo de minutos, têm-se empregado tecnologias que utilizam câmeras fotográficas com sensores CCD conhecidas como câmeras “*all sky*”. Os dados coletados por essas câmeras precisam passar por rotinas específicas que, em um primeiro passo, identificam a presença de nuvens e, em seguida, determinam a fração do céu coberta por nuvens e avaliam a incerteza do resultado já que ocorrem zonas de transição entre céu aberto e nuvens cuja identificação é de difícil quantificação. O uso de códigos de reconhecimento de padrões para distinguir céu claro de nuvens em imagens do céu vem sendo estudado intensamente nos últimos anos^{35,36}. O uso de imageadores, além de reduzir a subjetividade dos dados observacionais de nebulosidade, permite resolver a variabilidade da cobertura de nuvens em intervalos de tempo bastante curtos. A Figura 4.14 apresenta um modelo típico de imageador do céu e um exemplo de classificação automática da imagem por ele produzida. Devido ao grande alcance dinâmico da intensidade de luz que vem do Sol, câmeras CCD's comuns não

³⁵ MANTELLI NETO et al., 2010.

³⁶ URQUHART et al., 2015.

conseguem ajustar o tempo de exposição e abertura que permitam imagear todo o céu, o que resulta em saturação das imagens. Para superar essa limitação técnica, normalmente, os sistemas produzem uma imagem combinada após aquisição de duas ou três imagens em intervalo de tempo muito curto e com diferentes exposições.

Embora os satélites geoestacionários forneçam imagens digitais de grande precisão que possibilitam quantificar a cobertura de nuvens em áreas de grande extensão territorial, tais imagens são coletadas em frequência muito baixa (a cada 15 ou 60 minutos e, em alguns casos, até a cada três horas). Assim, a variabilidade temporal de curto prazo da cobertura de nuvens no céu, sobre o sistema de geração solar (particularmente a geração heliotérmica) pode não ser propriamente diagnosticada apenas com o uso de dados de satélite.

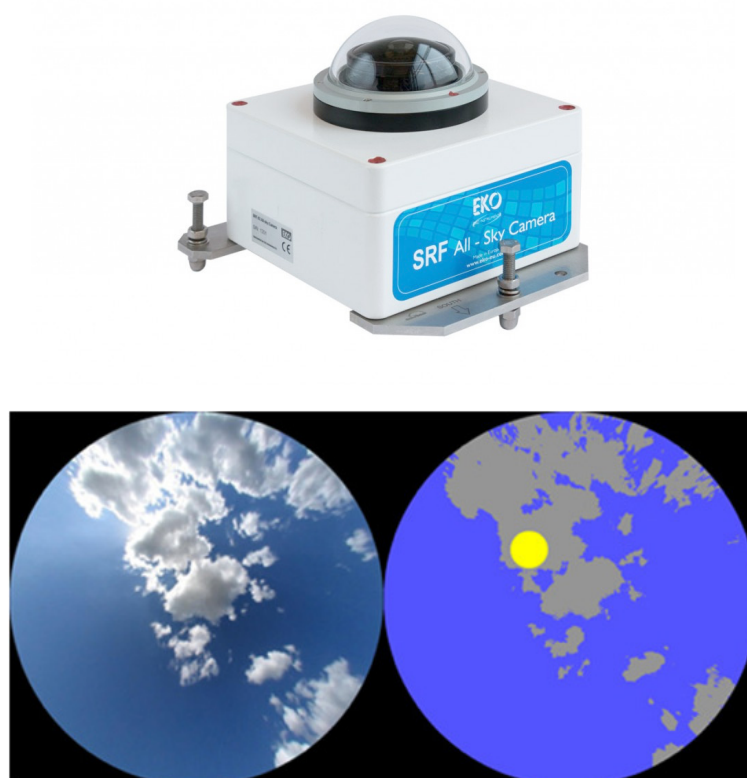


FIGURA 4.14 - IMAGEADOR AUTOMÁTICO PARA COLETA DE DADOS DE NEBULOSIDADE DO CÉU, ILUSTRANDO UMA IMAGEM APÓS CLASSIFICAÇÃO

FONTE: Adaptado de EKO Instruments BV (2018).

4.11 CLASSES DE RADIÔMETROS E INCERTEZA DAS MEDIDAS

As normas ISO e a WMO estabelecem classificações e especificações para a medição de irradiância solar (ISO 1990; WMO 2008). Em geral, os equipamentos são divididos em três classes distintas: alta qualidade (padrões secundários), boa qualidade (primeira classe) e qualidade moderada (segunda classe) – em parênteses a denominação ISO. A confiabilidade dos dados coletados é o critério principal para esta classificação. A Figura 4.15 ilustra graficamente a diferença entre as três classes de instrumentos em termos da precisão das medidas realizadas.

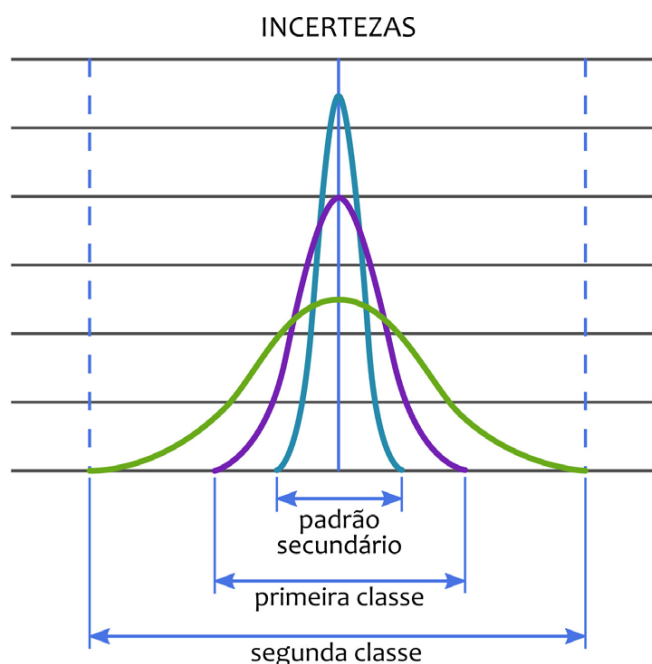


FIGURA 4.15 - COMPARAÇÃO DA PRECISÃO DAS MEDIDAS DE DADOS SOLARIMÉTRICOS REALIZADAS COM DIFERENTES CLASSES DE INSTRUMENTAÇÃO

FONTE: Os autores.

A acurácia ou exatidão de um equipamento de medida indica o quanto as medidas realizadas aproximam do valor de referência e está relacionada com desvios sistemáticos do radiômetro, geralmente atribuídos a problemas de calibração. Por outro lado, a incerteza

ou precisão está relacionada com o espalhamento das medidas em relação a um valor médio qualquer, relacionada a vários fatores instrumentais, tais como ruídos eletrônicos e flutuações térmicas em várias etapas do sistema e a manutenção precária dos equipamentos, tais como sujidades no domo, instabilidade estrutural da plataforma de coleta, sombreamentos diversos etc. A Figura 4.16 ilustra o conceito de acurácia e precisão em termos estatísticos. A Figura 4.17 ilustra, de forma visual e lúdica, os conceitos de precisão e acurácia. As imagens (b) e (d) referem-se, ambas, ao conceito de maior precisão uma vez que todos os pontos estão próximos e apontam nitidamente para um único ponto, mas não necessariamente o centro do alvo (valor de referência). Apenas a imagem (d) contempla exatidão e precisão com todos os pontos próximos do valor correto da grandeza física observada. A situação ilustrada em (b) pode ocorrer quando o sensor não está devidamente calibrado de forma que o sensor possui precisão nas observações, mas os valores produzidos estão distantes do valor referência da grandeza física.



FIGURA 4.16 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS CONCEITOS DE “PRECISÃO” E “EXATIDÃO” CONSIDERANDO A DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS VALORES OBSERVADOS EM RELAÇÃO AO VALOR DE REFERÊNCIA PARA A VARIÁVEL AVALIADA

FONTE: Os autores.

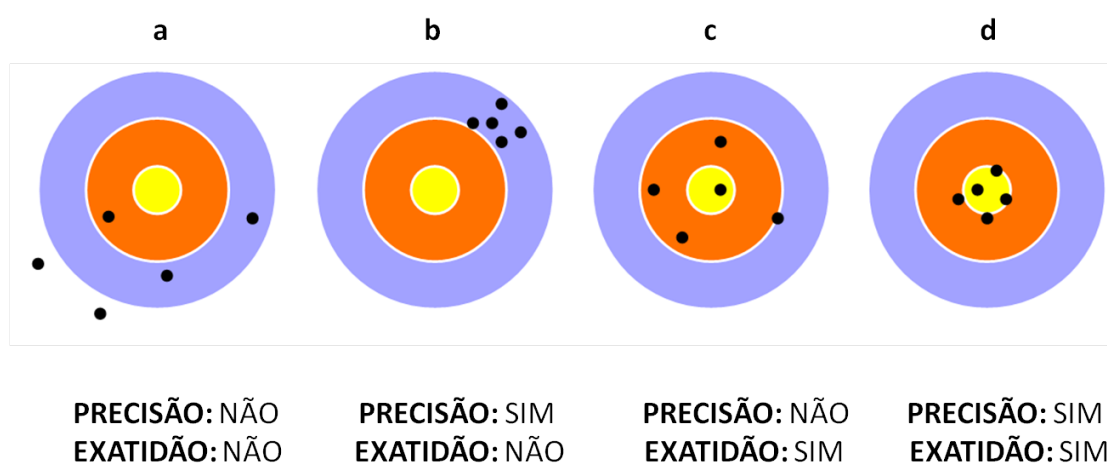


FIGURA 4.17 - EXEMPLO ILUSTRATIVO DO SIGNIFICADO FÍSICO PRÁTICO DOS CONCEITOS DE “PRECISÃO” E “ACURÁCIA”. O CENTRO DO ALVO REPRESENTA O VALOR DE REFERÊNCIA DA VARIÁVEL AVALIADA. OS CÍRCULOS NEGROS REPRESENTAM OS VALORES OBSERVADOS PARA A MESMA VARIÁVEL

FONTE: Os autores.

Instrumentos de alta qualidade, também conhecidos pela norma ISO como padrões secundários, podem ter uma grande acurácia; mas, dependendo de como as medidas foram realizadas e de como o operador da estação a mantém, podem fornecer resultados iguais ou até inferiores aos de radiômetros de classe inferior, mas bem instalados, calibrados e mantidos. As incertezas das medições dos radiômetros, resultam da qualidade das instalações, dos equipamentos, do local da instalação e das incertezas oriundas da operação dos mesmos no campo. As incertezas das medições de campo, mesmo para um pirheliômetro ou um piranômetro bem calibrado e bem instalado são tipicamente pelo menos duas vezes maiores do que a incerteza de calibração. Portanto, muito cuidado é necessário na operação e manutenção de uma estação solarimétrica. A Tabela 4-1 apresenta, de forma qualitativa, a relevância relativa das várias etapas de instalação, operação e manutenção de uma estação solarimétrica. As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram a classificação ISO 9060 e WMO (World Meteorological Organization) dos piranômetros e dos pirheliômetros. Para fins de levantamento de recursos de energia

solar para geração de energia, instrumentos de “primeira classe” ou “padrões secundários” devem ser utilizados apenas se o projeto tiver recursos financeiros suficientes e de longo prazo para apoiar a operação e manutenção, necessárias para garantir a qualidade das medidas.

TABELA 4.1 - RELEVÂNCIA RELATIVA DAS ETAPAS PRINCIPAIS DE UMA CAMPANHA DE MEDIÇÃO SOLARIMÉTRICA CONSIDERANDO O IMPACTO NAS INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES

ETAPAS	RELEVÂNCIA RELATIVA		
	MAIOR	MÉDIA	MENOR
OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO			
CONTROLE DE QUALIDADE			
GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE METADADOS			
ESCOLHA DE SENSORES			
MÉTODO DE INSTALAÇÃO			
ESCOLHA DO LOCAL			
FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM			
PERÍODO DE CAMPANHA			
CALIBRAÇÃO DE SENSORES			
AQUISIÇÃO DOS DADOS			

FONTE: Os autores.

TABELA 4.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA PIRANÔMETROS ESTABELECIDAS PELA NORMA ISO 9060

Especificações Técnicas ISO 9060	Padrão Secundário	Classe 1	Classe 2
Tempo de resposta para 95% do sinal de saída	< 15 s	< 30 s	< 6 s
Zero-offset: Offset A: resposta em condições de radiação térmica líquida até 200 W/m ² com ventilação; Offset B: resposta em condições de variação da temperatura ambiente em até 5 K/h	$+7 \pm 2 W / m^2$	$+7 \pm 2 W / m^2$	$+7 \pm 2 W / m^2$
Não-estabilidade: variação % da resposta por ano	$\pm 0,8 \%$	$\pm 1,5 \%$	$\pm 3,0 \%$
Não linearidade: desvio % em 500W/m ² devido a variação da irradiância entre 100 e 1000 W/m ²	$\pm 0,5 \%$	$\pm 1,0 \%$	$\pm 3,0 \%$
Resposta direcional: desvios por assumir que resposta para incidência normal é válido para qualquer direção	$\pm 10 W / m^2$	$\pm 20 W / m^2$	$\pm 20 W / m^2$
Seletividade espectral: variação % do produto da absorbância e transmitância em relação ao valor médio	$\pm 3 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$
Resposta para Temperatura: desvio % para variação de temp. ambiente de -10 a +40 °C.	$\pm 2 \%$	$\pm 4 \%$	8 %
Resposta para Inclinação: desvio % para variação da inclinação no intervalo de 0 a 90° em incidência de 1000 W/m ²	$\pm 0,5 \%$	$\pm 2,0 \%$	$\pm 5,0 \%$

FONTE: Adaptado da ISO 9060 (2003).

TABELA 4.3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA PIRHELIÔMETROS ESTABELECIDAS PELA NORMA ISO 9060

Especificações Técnicas ISO 9060	Padrão Secundário	Classe 1	Classe 2
Tempo de resposta para 95% do sinal de saída	< 15 s	< 30 s	< 30 s
Zero-offset: resposta em condições de variação da temperatura ambiente em até 5 K/h	$\pm 2 W / m^2$	$\pm 4 W / m^2$	$\pm 8 W / m^2$
Resolução (menor variação detectável)	$\pm 0,5 W / m^2$	$\pm 1 W / m^2$	$\pm 5 W / m^2$
Estabilidade: variação % na resposta, por ano	$\pm 0,1 \% a \pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \% a \pm 1,0 \%$	$\pm 2 \%$
Resposta para Temperatura: desvio % para variação de temperatura ambiente no intervalo de -10 a +40 °C.	$\pm 1 \%$	$\pm 2 \%$	10 %
Não linearidade: desvio % em 500W/m ² devido a variação da irradiância entre 100 e 1000 W/m ²	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 2,0 \%$
Seletividade espectral: variação % do produto da absorbância e transmitância em relação ao valor médio	$\pm 0,5 \%$	$\pm 1,0 \%$	$\pm 5,0 \%$
Resposta para Inclinação: desvio % para variação da inclinação no intervalo de 0 a 90° em incidência de 1000 W/m ²	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 2,0 \%$

FONTE: Adaptado da ISO 9060 (2003).

4.12 REQUISITOS PARA UMA ESTAÇÃO DE COLETA DE DADOS SOLARIMÉTRICOS

A instalação e operação de uma estação de coleta de dados para avaliação do recurso solar requer uma série de cuidados e procedimentos que possibilitam minimizar as incertezas inerentes a todo processo de aquisição de dados de campo. Procedimentos padrões estão estabelecidos por diversos organismos internacionais com o intuito de possibilitar a realização de estudos e comparações com o uso e o compartilhamento de dados observados em diversas regiões do mundo com a confiabilidade necessária para as aplicações em diversos domínios da economia, incluindo o setor de energia. Entre eles, pode-se citar o manual de operações para a rede BSRN (Baseline Surface Radiation Network)³⁷, um dos mais restritivos existentes. Para utilização específica na área de energia solar, pode-se listar a recomendação elaborada pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL)³⁸.

O primeiro aspecto a ser observado é a localização da estação de coleta de dados. Existem algumas regras básicas que devem ser observadas para a escolha do local de instalação com o intuito de buscar qualidade nos procedimentos para aquisição de dados. Podemos destacar que:

- *o local deve ser consistente com a finalidade para a qual as observações serão realizadas e deve ser representativo de uma área relativamente grande que apresente características ambientais comuns (por exemplo, se o local apresentar um microclima único dentro de uma região maior não irá representar a climatologia solar regional);*
- *os instrumentos de medida devem ser montados de acordo com as especificações técnicas dos respectivos manuais de instalação e permitir fácil acesso ao operador de manutenção local;*

³⁷ MCARTHUR, 2005.

³⁸ SENGUPTA et al., 2015.

- *deve-se adotar atenção extrema para que os instrumentos de medida não sombreiem um ao outro que é normalmente conseguido quando se orienta a plataforma dos instrumentos na direção leste-oeste;*
- *o local não deve estar muito próximo de estradas ou vias não pavimentadas e/ou com tráfego intenso, de fontes de poeira, poluição do ar e aerossóis;*
- *o local deve ter visada desimpedida no ângulo sólido de 180°. Para isso, por ocasião da visita aos locais candidatos, deve-se sempre tirar fotos panorâmicas do horizonte;*
- *medidas piranométricas são relativamente tolerantes a obstruções de até 5° de elevação no horizonte, no entanto pirheliômetros são muito mais sensíveis a tais obstruções uma vez que podem bloquear completamente a componente direta da irradiância solar (G_{dni}) no início e fim do dia;*
- *deve-se ter o cuidado de escolher um local com baixa probabilidade de haver alteração no uso da terra (plantações de árvores, p/exemplo) ou de novas edificações nas proximidades durante o período de tempo planejado para a aquisição de dados;*
- *o local deve possuir infraestrutura de suporte operacional e segurança contra vandalismo;*
- *deve haver atendimento de rede elétrica nas proximidades;*
- *deve possuir sistema de aterramento adequado incluindo dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) e para proteção contra descargas elétricas locais (para-raio);*
- *deve possuir pontos de acesso à internet ou sinal de celular para transmissão dos dados;*

Quanto à escolha do local, sob o ponto de vista dos objetivos primários do projeto, as regras recomendadas são:

- *se a coleta de dados tem como objetivo o desenvolvimento e validação de modelos de avaliação do recurso solar, os locais devem ser escolhidos de forma a melhor representar as características típicas do clima na região de interesse;*
- *ainda com o objetivo de desenvolvimento e validação de modelos de avaliação do recurso solar, deve levar em conta a influência dos grandes centros urbanos nas proximidades do local previsto para instalação da estação;*

- *se objetivo for estudo de viabilidade para fins de implantação de sistemas de geração solar, as estações devem ser montadas, sempre levando em conta a topografia e o uso local da terra – não instalar em local onde não seja possível desenvolver o projeto de engenharia (ex: topografia complexa ou sombreamento por edificações)*
- *ainda com objetivo de avaliar viabilidade de implantação de sistemas de geração solar, o local de instalação da estação deve ser representativo da área na qual o projeto deverá ser implantado e levar em conta que a representatividade de uma estação de coleta de dados é sempre inferior a um raio de 40km^{39,40}.*
- *se o objetivo é a coleta de dados para atender requisitos para participação de leilões de energia, deve-se atentar que a operação da estação solarimétrica deve atender aos requisitos estabelecidos pela agência reguladora que em geral estabelece a extensão da série temporal da coleta de dados e um padrão de qualidade mínimo no que tange ao número de falhas da estação e à consistência com base em dados solarimétricos de longa duração (tal como dados de modelos computacionais baseados em satélite), para se ter informações sobre a climatologia solar na região-alvo⁴¹.*

Uma vez escolhido o local da estação, passamos nossa atenção para a escolha da instrumentação a ser utilizada na aquisição de dados. O usuário deve considerar o nível de incerteza que deve ser atendido pela base de dados observados em campo. O usuário também deve avaliar a relação de custo-benefício da instrumentação a ser instalada considerando não apenas o investimento para compra da instrumentação, mas também o custo de operação e manutenção da estação de coleta de dados tendo em mente a duração da campanha de medidas. Estudo realizado por solicitação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE)⁴², classifica as estações de coleta de dados solarimétricos destinadas a levantar dados para projetos de planta solar concentrada (heliotérmica) em três categorias:

³⁹ MARTINS; PEREIRA, 2011.

⁴⁰ HOFF; PEREZ, 2011.

⁴¹ Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.

⁴² Relatório técnico EPE.

- Estações de Categoria 1 – *devem possuir sensores “padrão secundário”, conforme norma ISO 9060, incluindo o pirheliômetro e seguidor solar com procedimentos de operação e manutenção em conformidade as normas estabelecidas pela BSRN-WMO; devem proceder aquisição de dados com resolução temporal de 1 s e armazenamento de valores médios a cada 1 min; e devem apresentar menos de 5% de falhas nos dados durante a campanha de medição;*
- Estações de Categoria 2 – *devem utilizar sensores de primeira classe conforme norma ISO 9060; devem realizar a coleta de dados com resolução temporal de até 1 min e armazená-los com frequência entre um minuto e uma hora; e podem apresentar mais de 5% de falhas nos dados durante todo o período de medição;*
- Estações de Categoria 3 – *utilizam comumente os sensores de segunda classe ou fotodiodos e radiômetros de banda rotativa; não requerem um procedimento de operação e manutenção bem estabelecido de modo que podem apresentar muitas falhas durante a campanha de coleta de dados; podem utilizar frequência da coleta de dados inferiores a uma hora e armazenam dados médios horários.*

O custo total de aquisição e montagem de uma estação solarimétrica utilizando instrumentos de primeira classe (Categoria 1) não é recomendado se não for acompanhado com um esquema eficiente de operação e manutenção da estação. Além disso, com o intuito de minimizar a interrupção na coleta de dados por períodos prolongados de tempo, é importante garantir a aquisição de, pelo menos, um conjunto completo de equipamentos para substituição da instrumentação em caso de mau funcionamento ou retirada dos sensores para calibração/aferição.

Uma estação de monitoramento solar consiste, no mínimo, de um piranômetro para medir a irradiância horizontal global (G) e um piranômetro sombreado por anel de sombreamento para medir a irradiância horizontal difusa (G_{dif}). Um pirheliômetro acoplado a um seguidor solar deve ser adicionado para a realização de medidas das componentes direta (G_n) e difusa (G_{dif}) da irradiância solar em uma estação Categoria 1. Um pirgeômetro é frequentemente adicionado com a finalidade de avaliar a viabilidade de plantas térmicas com a tecnologia CSP (Planta térmica com concentração solar). Quando

a coleta de dados destina-se ao estudo de plantas fotovoltaicas, recomenda-se também um piranômetro em um plano inclinado montado na mesma geometria que os painéis fotovoltaicos para monitorar o desempenho do sistema de geração solar.

Todas as estações solarimétricas devem estar instrumentadas para registrar, no mínimo, dados de temperatura do ar no mesmo local e com a mesma frequência de amostragem que as medições de radiação solar. A medição da temperatura deve ter uma resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e uma incerteza inferior a $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. As estações de Categoria 1 devem ainda estar providas de sensores para monitoramento de outras variáveis ambientais como vento (velocidade e direção), pressão atmosférica e precipitação, ou instaladas nas proximidades de uma estação meteorológica que contemple tais medições. Esse requisito é também recomendado para estações de Categoria 2, embora não obrigatório, já que esses dados são necessários para análise de desempenho da futura planta e/ou da planta em operação.

Muita atenção deve ser dada ao projeto e à montagem da plataforma física de instalação dos sensores da estação solarimétrica. O projeto deve ser simples, porém robusto, estável e durável. A Figura 4.18 ilustra três projetos de plataformas de aquisição de dados que atendem a esses requisitos. A primeira, Figura 4.18(a), ilustra uma plataforma para estação típica da Categoria 1, destinada a medidas de altíssima qualidade e confiabilidade para estudos científicos diversos, com período de longa duração de coleta de dados. A Figura 4.18(b) apresenta uma estação destinada à coleta de dados por período de longa duração para fins de levantamento de recurso solar e calibração de modelos radiativos (Categoria 2); e a terceira, em Figura 4.18(c), é uma estação comercial típica destinada especificamente a campanhas de estudos de viabilidade de projetos solares, padrão recomendado para solicitação de cadastramento e habilitação técnica na participação de Leilões de Energia Elétrica⁴³.

⁴³ Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

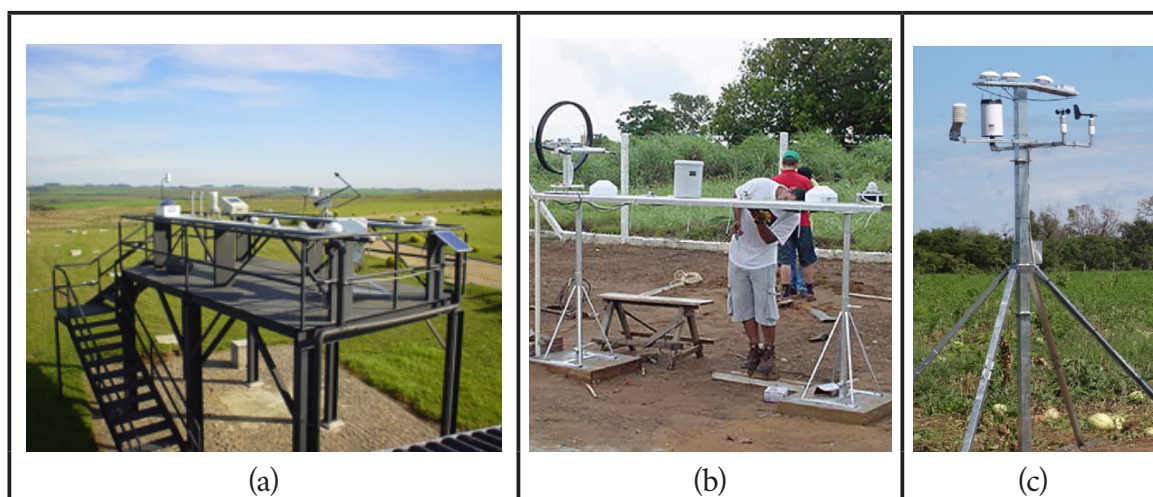


FIGURA 4.18 - IMAGENS DE PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS SOLARIMÉTRICOS. A COMPLEXIDADE DA INSTALAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO ESTÁ RELACIONADA AOS OBJETIVOS ESTABELECIDOS PARA O USO DOS DADOS OBSERVADOS NO CAMPO

FONTE: Os autores.

Atenção especial deve ser dedicada aos suportes e às bases para os instrumentos, em particular, para o seguidor solar. Devem ser bem rígidos e não devem sofrer deformação com mudanças de temperatura e umidade. Também não devem sofrer movimentação ou vibração quando submetidos às condições de ventos fortes. O uso de madeira na construção das plataformas deve ser evitado. Os comprimentos dos cabos devem ser minimizados e, em qualquer caso, o cabeamento de sinal dos instrumentos não deve ser superior a 50 m de extensão. As unidades de ventilação dos piranômetros são necessárias para áreas sujeitas à poeira, orvalho, geada e precipitação. A ventilação também reduz os desvios e incertezas das medições uma vez que estabiliza a resposta do instrumento em condições de variações térmicas bruscas.

Em geral, o procedimento de operação de estações de Categoria 1 e 2 requer a aquisição de dados com frequência de 1 Hz (uma amostragem por segundo) de todas as variáveis solarimétricas. No entanto o registro e armazenamento devem atender, no mínimo, à frequência de um registro por minuto com as seguintes informações: valores médio, mínimo e máximo e o respectivo desvio-padrão. Quando o registro automático de dados também é empregado na coleta de dados de variáveis

meteorológicas (temperatura, pressão, umidade, velocidade e direção do vento) recomenda-se que sejam registrados na mesma frequência dos dados solarimétricos, ou seja, a cada minuto. Essa recomendação não se aplica aos dados das câmeras imageadoras, ao espectroradiômetros e fotômetros solares (se houverem), que seguem protocolos operacionais específicos conforme o objetivo de cada missão de coleta de dados.

4.13 ARMAZENAMENTO DOS DADOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA

Como estudamos nos tópicos anteriores, podemos compreender que um sensor pode ser definido como sendo um elemento capaz de converter uma grandeza física como a irradiância, temperatura, umidade, pressão atmosférica etc. em outro tipo de grandeza física. No passado, essas grandezas físicas eram normalmente lidas e anotadas em formulários ou convertidas em algum sinal mecânico para registro em papel. Atualmente, elas são convertidas em um sinal elétrico que deve então ser “traduzido” para um valor numérico correspondente à grandeza física medida e armazenado para processamento e análise posterior.

Os sinais elétricos produzidos pelos sensores podem ser classificados em analógicos ou digitais. Os sinais analógicos apresentam uma variação contínua ao longo do tempo, enquanto um sinal digital assume valores discretos no tempo. A fim de ilustrar a diferença entre eles, apresentamos os seguintes exemplos. O sensor de temperatura fornece um sinal de tensão analógico com variação contínua ao longo do tempo associada com a variação da temperatura do ambiente. O pluviômetro de balança pode ser citado como exemplo de sensor que fornece um sinal digital produzido por uma chave que abre (desliga) ou fecha (liga) a cada momento em que a balança se enche de água e registra um volume fixo de chuva.

Outro aspecto a ser considerado é sobre a natureza do sinal elétrico analógico que pode variar no domínio da amplitude ou da frequência. No domínio da amplitude, o sinal elétrico (em volts) varia

sua amplitude continuamente de forma proporcional à variação da grandeza física medida. No domínio da frequência, a amplitude do sinal é irrelevante e pode até ser constante, mas sua frequência varia proporcionalmente a variação da grandeza física medida. A Figura 4.19 ilustra como um sinal que varia senoidalmente em amplitude (a) é representado no domínio da frequência (b). Um anemômetro de copo utilizado para medida de velocidade de vento, por exemplo, é um sensor que fornece um sinal elétrico alternado de amplitude constante cuja frequência varia proporcionalmente a velocidade do vento (cada giro do anemômetro temos uma oscilação senoidal).

Em ambos os casos de sinais analógicos, o comprimento e impedância do cabo de transmissão de dados até o sistema de registro e armazenamento de dados é de fundamental importância. Cabos com grande extensão e/ou casamentos de impedância incorretos, além de atenuar o sinal do sensor, podem induzir ruídos elétricos que levam ao aumento na incerteza e desvios sistemáticos nas medidas. Isso é particularmente importante em sensores de saída analógica de amplitude variável. Por conta dessa limitação, os sensores de saída analógica devem ser instalados próximos ao sistema de coleta e registro dos dados seguindo rigidamente as especificações dos seus fabricantes.

A limitação que se apresenta com sinais analógicos pode ser contornada por meio da conversão dos dados analógicos em digitais, conhecida como conversão A/D. A grande vantagem dessa conversão é que os sinais podem ser transportados a longas distâncias e interpretados diretamente pelos sistemas modernos de registro e tratamento de dados digitais. A Figura 4.20 ilustra como é realizada a amostragem de um sinal analógico de amplitude modulada e sua conversão em um sinal digital. Primeiramente, o sinal analógico é amostrado em intervalos de tempo constantes, denominados de taxa de amostragem. Em seguida, os sinais amostrados são convertidos pelo conversor A/D resultando em uma sequência binária de “zeros” e “uns” descrita em bytes (conjuntos de 8 bits) necessários para representar cada ponto da curva amostrado.

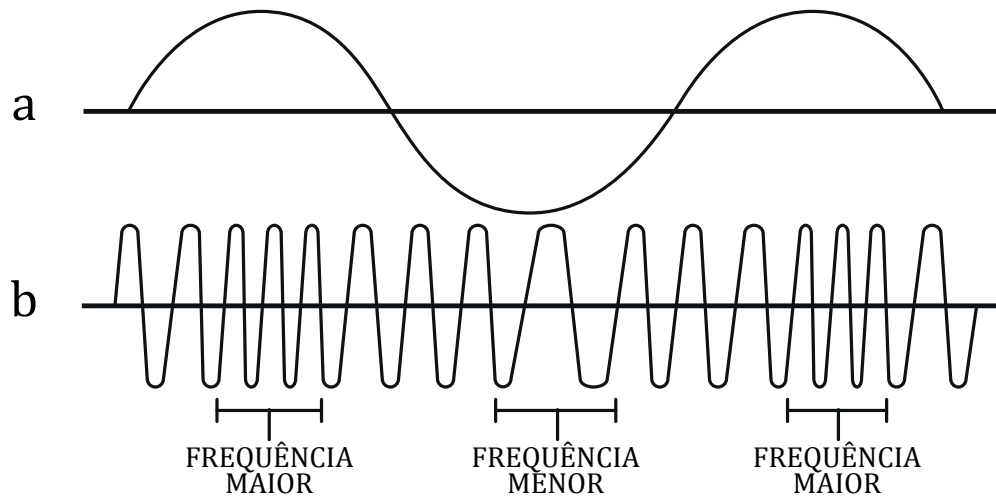


FIGURA 4.19 - ILUSTRAÇÃO DE SINAIS ANALÓGICOS NO DOMÍNIO DA AMPLITUDE (A) E DA FREQUÊNCIA (B)

FONTE: Os autores.

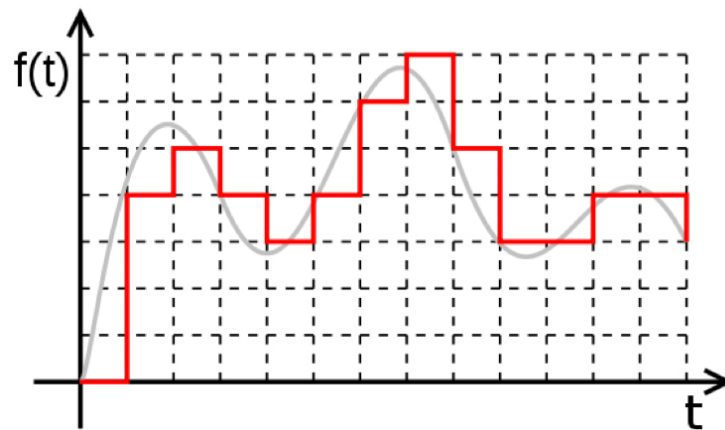


FIGURA 4.20 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE CONVERSÃO ANALÓGICA PARA DIGITAL DE UM SINAL ELÉTRICO. A LINHA CONTÍNUA NA COR CINZA REPRESENTA O SINAL ANALÓGICO PRODUZIDO PELO SENSOR E A LINHA VERMELHA INDICA O SINAL DIGITAL CORRESPONDENTE OBTIDO COM A TAXA DE AMOSTRAGEM DEFINIDA PELA GRADE ILUSTRADA EM LINHAS PONTILHADAS VERTICAIS

FONTE: Os autores.

O instrumento projetado para controlar a aquisição de dados e armazenar os registros dos valores medidos por cada um dos sensores de uma estação solarimétrica é denominado *datalogger*. É um dispositivo capaz de amostrar sensores elétricos analógicos e ou digitais com uma periodicidade definida pelo usuário por meio de script (código computacional) editado pelo usuário. As informações podem ser armazenadas em sua memória interna, ou gravadas em cartão de “memória flash” (SD). O *datalogger* permite manipular os valores medidos realizando cálculos estatísticos e uma variedade de procedimentos. Os registros armazenados podem ser transmitidos, utilizando a internet, rádio, satélite etc., para um centro de armazenamento definitivo da base de dados observados na estação solarimétrica.

Os *dataloggers* modernos possuem entradas analógicas e digitais, porém todas as entradas analógicas são convertidas em digitais pelo conversor A/D interno. Há diversos modelos de *datalogger* no mercado, e sua escolha deve levar em consideração os aspectos relacionados à quantidade de grandezas físicas observadas na estação (número de sensores em operação) e à infraestrutura/logística disponível para acesso e transferência dos dados armazenados temporariamente no *datalogger*. A Figura 4.21(a) apresenta o painel frontal típico de um *datalogger* moderno empregado em estações solarimétricas, no qual se pode ver os pentes de conexões de entradas, o teclado e o visor utilizados para programar a sequência de coleta e registro dos dados, e (b) um esquema de conexões em uma estação solarimétrica Categoria 2.

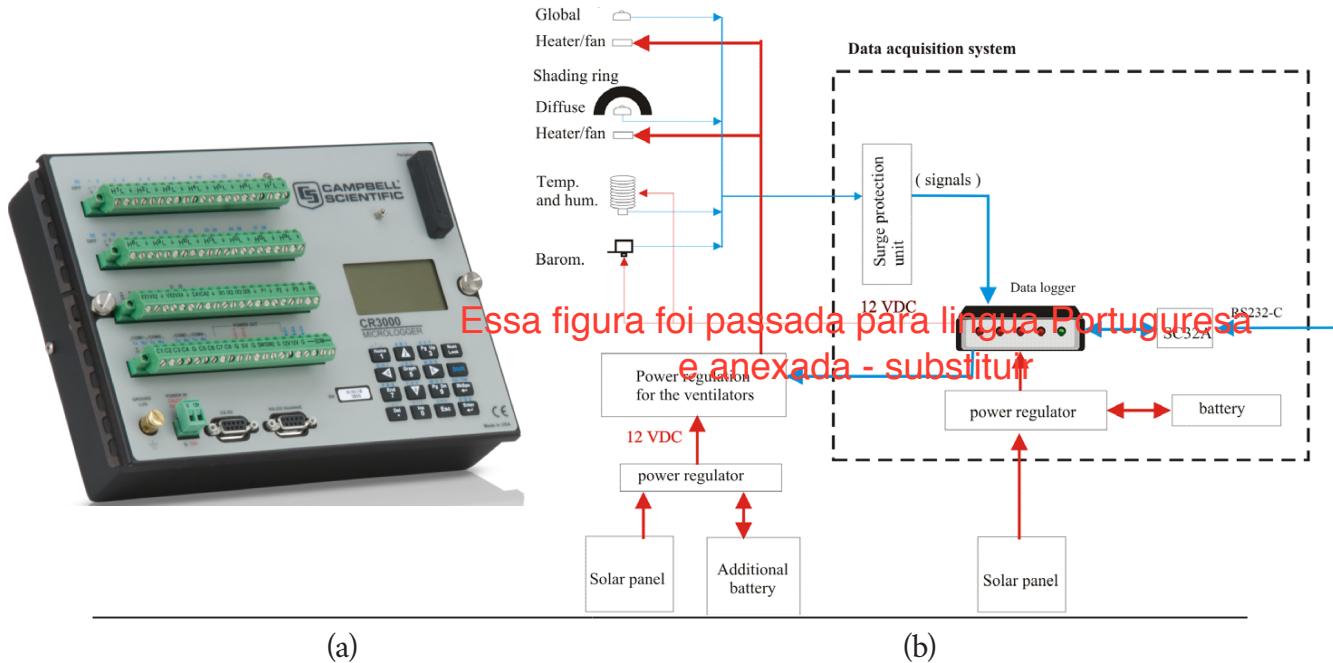


FIGURA 4.21 - IMAGEM DO PAINEL FRONTAL TÍPICO DE UM *DATALOGGER* (a) E UM EXEMPLO DE DIAGRAMA DE CONEXÕES EM UMA ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA CATEGORIA 2 (b)

FONTE: Os autores.

4.14 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

A manutenção dos instrumentos em condições ideais é essencial para dados de medição de alta qualidade. Isso inclui desde visitas constantes de inspeção dos equipamentos até a calibração dos sensores. Toda manutenção realizada, ações corretivas e calibrações realizadas devem ser registradas em um relatório que deve ser arquivado para eventual consulta. A seguir, estão listadas recomendações mínimas que devem ser seguidas pelos operadores das estações solarimétricas.

4.14.1 Manutenção diária

Idealmente, a rotina diária de manutenção de uma estação solarimétrica deve ser realizada antes do nascer do Sol com o intuito de maximizar o tempo de medição e evitar perda de dados em horários de elevada incidência de radiação solar. As atividades aqui recomendadas são importantes, mas pode acontecer que sua execução não seja viável

com a periodicidade indicada em razão de distância e dificuldade de acesso ao local da estação. Nesses casos, as atividades de manutenção devem ser realizadas com a periodicidade possível sempre considerando o risco de perda de confiabilidade dos dados observados quando ocorrem longos períodos sem assistência da estação solarimétrica. As atividades que devem ser observadas com maior frequência são:

- *limpeza e verificação de marcas ou danos estruturais das janelas e cúpulas óticas (incluindo o sensor de posição do Sol nos rastreadores solares, câmeras all-sky, fotômetros e espectrômetros se houver) usando um pano macio e sem fiapos. Se houver algum depósito ou sujeira, água limpa (destilada, de preferência) ou álcool deve ser usado em um pano limpo;*
- *em situações de baixas temperaturas com a presença de geada, deve-se proceder o aquecimento da cúpula suavemente se o gelo não puder ser removido com a limpeza (use, por exemplo, um secador de cabelo e nunca raspe o gelo de uma cúpula ou janela);*
- *verifique se há condensação dentro das cúpulas externas dos piranômetros;*
- *verifique se os instrumentos e o rastreador solar estão nivelados;*
- *verifique se o pireliômetro e as esferas de sombreamento estão corretamente alinhados, e realinhe, se necessário;*
- *verifique a integridade dos cabos de alimentação e de dados dos instrumentos instalados;*
- *verifique se os ventiladores da unidade de ventilação estão funcionando;*
- *inspecione todos os sistemas de coleta de dados meteorológicos e certifique se o sistema de aquisição de dados (datallogger) está funcionando corretamente;*
- *verifique se o sistema de transmissão de dados está funcionando corretamente;*

4.14.2. Manutenção semanal (ou quinzenal, ou mensal)

Há um conjunto de atividades que não precisam ser realizadas diariamente, mas exige atenção periódica regular a fim de garantir a integridade e confiabilidade da base de dados medida pela estação:

- *verificar o dessecante em cada instrumento e substituir, se necessário (geralmente o dessecante apresenta uma vida útil de vários meses);*
- *ao substituir o dessecante, verificar se há danos no anel de vedação e substituí-lo, se necessário;*
- *limpar as blindagens dos radiômetros;*
- *inspecionar a plataforma onde a instrumentação está instalada quanto a deterioração, desalinhamento, danos físicos, sombreamento etc.;*
- *verificar e registrar a resistência de cada instrumento na extremidade do cabo de sinal próximo ao sistema de aquisição de dados (primeiro, desconecte o cabo da entrada do datalogger);*
- *verificar a operação correta do sistema de aquisição de dados utilizando uma fonte de tensão de referência em cada entrada do datalogger.*

4.14.3. Manutenção semestral (ou anual, quando possível)

Há ainda um conjunto de atividades que devem ser cumpridas minimamente uma vez ano para atender aos requisitos estabelecidos na normatização de coleta de dados meteorológicos e radiométricos. São elas:

- *substituir os piranômetros (e pirgeômetros, se houver) por aparelhos previamente calibrados (sobressalentes em estoque).*
- *substituir quaisquer itens que mostrem sinais de deterioração (por exemplo, cabos de dados ou elétricos).*
- *verificar os filtros da unidade de ventilação e limpar ou substituir conforme necessário (pode ser necessária uma inspeção mais frequente em ambientes empoeirados);*
- *verificar as vedações de invólucros à prova de intempéries, aplicar graxa, se necessário;*
- *providenciar execução dos serviços de manutenção do rastreador solar recomendados pelo fabricante;*

4.14.4 Calibração dos piranômetros

A calibração de piranômetros tem como objetivo determinar a relação entre o valor real do irradiância solar incidente e o valor do

sinal de saída produzido pelo sensor. Os piranômetros termoeletrônicos são, geralmente, calibrados em W/m^2 e produzem uma voltagem de saída na região de 5 a 20 μV (microvolts) por W/m^2 de irradiância. A faixa de medição é geralmente de até 2.000 W/m^2 quando calibrados sob a luz solar natural e 4.000 W/m^2 se calibrados em simuladores para radiação solar.

A norma ISO 9846:1993⁴⁴ descreve o método de “Sol e Sombra” para calibração de piranômetros usando um pirheliômetro de referência (geralmente um radiômetro de “cavidade absoluta”) sob luz solar natural e em condições de céu claro (sem nuvens). O método baseia-se no fato de que a irradiância global (G) é determinada pela soma das componentes direta normal (G_n) e difusa (G_{dif}), de modo que a diferença entre as medidas sombreadas e não sombreadas realizadas com o piranômetro deve ser igual à componente direta normal medida com o pirheliômetro de referência corrigida pelo cosseno do ângulo zenital, conforme a equação (4.6):

$$G = G_{dif} + G_{dir} \cos \theta_z \quad (4.6)$$

O piranômetro a ser calibrado é exposto à radiação difusa (com uso do ocultador esférico acoplado em um seguidor solar) e à radiação global de forma intercalada, por períodos de tempo predefinidos. Durante as medidas de radiação difusa, os sensores devem ser protegidos da radiação direta com precisão em todas as elevações solares para evitar desvios (offsets), sem excluir parte do céu difuso.

Essa metodologia de calibração requer condições climáticas amenas (temperaturas aproximadas de 25 °C) e um pirheliômetro de referência e, portanto, normalmente é feito apenas por institutos com a instrumentação apropriada. O instrumento de referência deve ser certificado pelo centro de referência de instrumentos de radiação solar direta e difusa no World Radiation Center em Davos, Suíça <<http://www.meteoswiss.admin.ch/home/research-and-cooperation/international->

⁴⁴ International Standards Organization, 1993.

cooperation/pmod-wrc.html>. Um procedimento alternativo utilizado usualmente para verificar a calibração original de piranômetros pode ser feito de empregando metodologia similar à descrita acima, mas utilizando um piranômetro padrão secundário como referência. Nesse caso, é importante estar ciente de que se trata apenas de uma verificação e que o procedimento não é válido em termos de certificação da calibração do instrumento. Também é preciso que o piranômetro padrão de referência esteja com o seu certificado dentro do período de validade.

Os fabricantes de piranômetros normalmente recomendam um método de calibração independente das condições atmosféricas e ambientais, uma vez que a metodologia “Sol–Sombra” pode demandar tempo excessivamente longo em decorrência de condições meteorológicas inadequadas. Nesse caso, a calibração é realizada em laboratório com uso de um simulador que utiliza uma lâmpada emissora de radiação eletromagnética com espectro similar à radiação solar. Esse procedimento necessita de um piranômetro de referência (padrão) e está descrito na norma ISO 9847:1992⁴⁵. A Figura 4.22 ilustra um simulador solar para calibração de radiômetros e piranômetros:

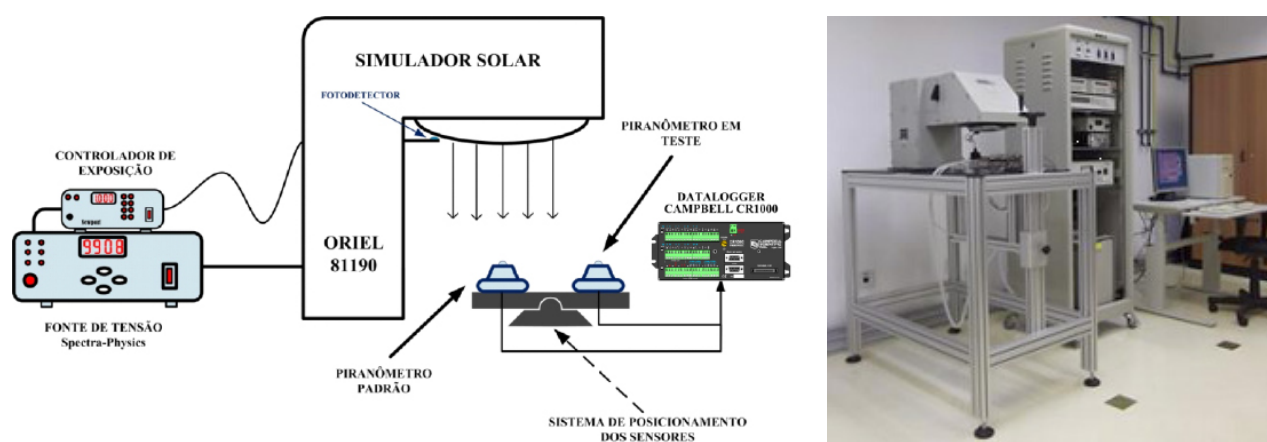


FIGURA 4.22 – SISTEMA SIMULADOR SOLAR PARA CALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

FONTE: Guimarães et al. (2015).

⁴⁵ International Standards Organization, 1992.

4.14.5 Controle de qualidade dos dados

O controle de qualidade dos dados de uma estação solarimétrica constitui etapa tão importante quanto a qualidade da instrumentação e manutenção e operação da mesma descritos anteriormente. O controle de qualidade de bases de dados coletados em campo possui um papel fundamental em alertar o operador ou responsável sobre a ocorrência de problemas técnicos na aquisição de dados, como a necessidade de calibração de sensores devido à perda de desempenho. Existem vários procedimentos para executar o controle de qualidade dos dados^{46, 47, 48, 49, 50}. Aqui, vamos descrever sucintamente o procedimento adotado para a base de dados coletados nas estações da rede Sonda operada pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (Labren/INPE). O controle de qualidade de dados baseia-se em critérios estabelecidos pela WebMet (*The Meteorological Resource Center*) e pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) para a “*Baseline Surface Radiation Network*” (BSRN) e adota quatro níveis de avaliação:

- Nível 1 - avalia se o dado observado na estação é fisicamente possível;
- Nível 2 - avalia se o dado observado ocorre com frequência muito baixa (evento raro);
- Nível 3 – avalia se a série temporal de dados coletados apresenta variabilidade consistente com as observações históricas para o local, ou se apresenta consistência com medidas realizadas por instrumentos distintos ou com dados observados de outras variáveis na mesma estação;
- Nível 4 – compara e avalia consistência dos dados observados com valores fornecidos por modelos de transferência radiativa.

⁴⁶ National Renewable Energy Laboratory, 1993.

⁴⁷ LONG; DUTTON, 2002.

⁴⁸ YOUNES et al., 2005.

⁴⁹ HOYER-KLICK et al., 2008.

⁵⁰ LONG; SHI, 2008.

A Figura 4.23 apresenta o diagrama de blocos do programa de controle de qualidade dos dados adotado na rede Sonda⁵¹. A atribuição de boa qualidade em cada etapa do controle de qualidade é requisito para a continuidade do procedimento. Logo, a avaliação de qualidade no nível seguinte será realizada apenas quando o dado for considerado válido, isto é, de “boa qualidade”, num determinado nível. Se dado for considerado suspeito, isto é, de “má qualidade”, o processo será interrompido e o dado receberá o código indicando a suspeita de falha na aquisição de dados. Esse procedimento deverá ser realizado para cada uma das variáveis meteorológicas e solari-métricas observadas na estação. No fim do controle de qualidade, todos os dados coletados terão armazenados os seus respectivos códigos identificadores de qualidade. Os critérios adotados em cada uma das etapas estão descritos detalhadamente na página de acesso público aos dados <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>>.

⁵¹ DIAS et al., 2014.

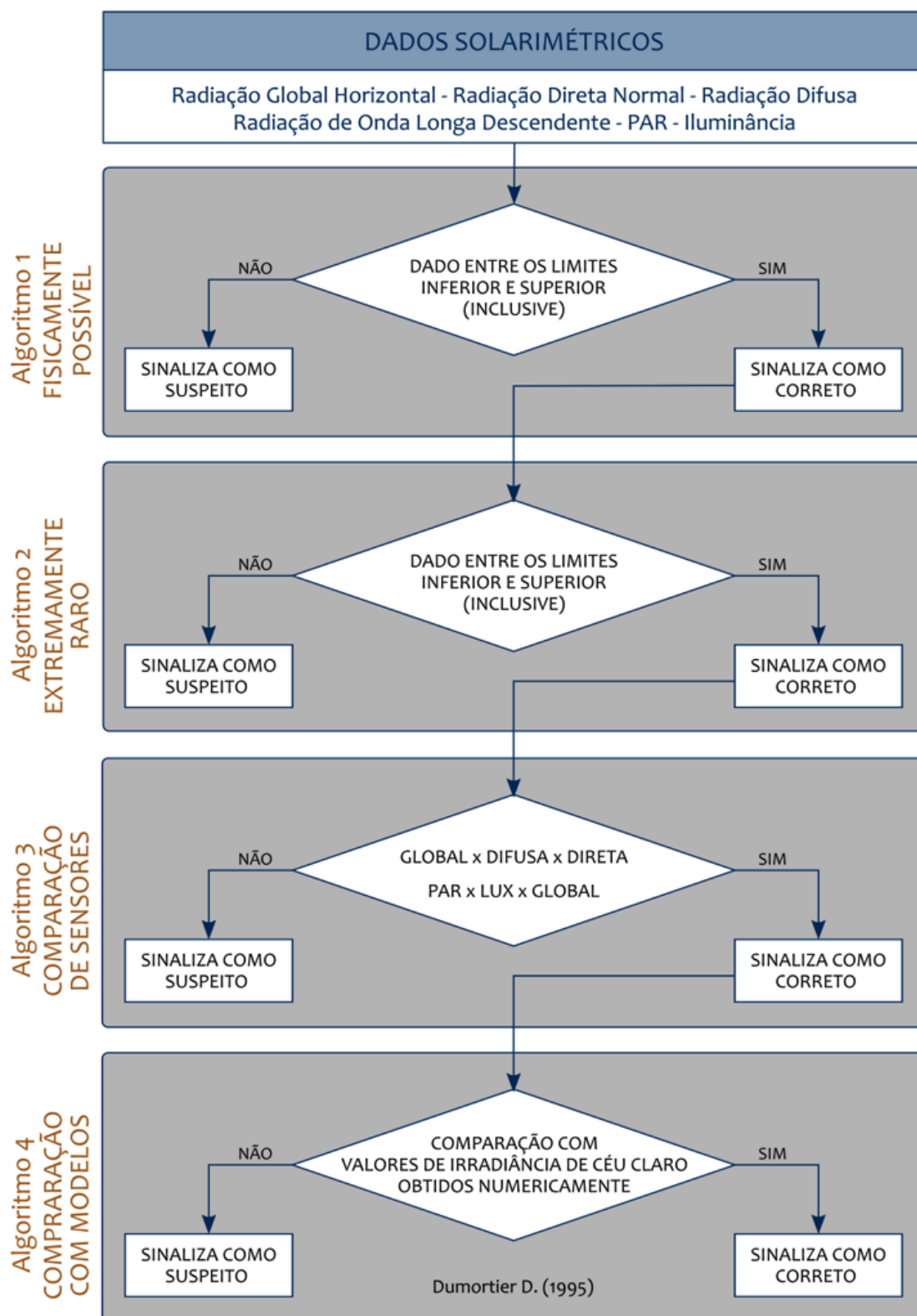


FIGURA 4.23 – FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS COLETADOS EM ESTAÇÕES SOLARIMÉTRICAS PARTICIPANTES DA REDE SONDA OPERADA PELO LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA

FONTE: Os autores.

MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À ENERGIA SOLAR

A obtenção de estimativas numéricas da irradiação solar incidente na superfície está baseada no conhecimento dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera e na capacidade de simulação numérica destes processos. Como descrito no capítulo 3, a radiação solar realiza complexas interações de espalhamento e absorção com os constituintes atmosféricos e a superfície do planeta. A Figura 3.3 ilustra, de forma bastante simplificada, os principais processos de interação da radiação solar no sistema Atmosfera-Terra. Dada a complexidade dos processos de interação entre a radiação solar com a atmosfera, fica evidente que as condições meteorológicas típicas e a composição da atmosfera de um dado local estão intrinsecamente ligadas à disponibilidade de energia solar na superfície terrestre.

Vimos anteriormente que a Figura 3.2 mostra um exemplo típico do espectro da transmitância atmosférica da radiação solar de ondas curtas que atinge a superfície do planeta. Embora a forma desse espectro mude de local para local e varie com o tempo, as principais feições originadas pela atenuação diferenciada da intensidade da radiação solar em vários comprimentos de onda estão bem representadas e são características dos processos de espalhamento e absorção que ocorrem na atmosfera. Um aspecto importante é que há intervalos espectrais em que praticamente não há atenuação da irradiação solar pela atmosfera. Por outro lado, há outros intervalos espectrais em que ocorre atenuação bastante intensa podendo atingir uma extinção total para certos intervalos de comprimento de onda. A proporção da atenuação está intrinsecamente relacionada à concentração e distri-

buição de alguns gases atmosféricos e particulados na atmosfera. As condições meteorológicas modificam a atmosfera e, portanto, alteram o espectro de radiação solar incidente na superfície, por exemplo, a atenuação espectral associada ao vapor de água, gelo e gotículas de água é maior em momentos de maior nebulosidade.

A modelagem numérica para estimar e prever a disponibilidade do recurso de energia solar na superfície está baseada numa descrição matemática ou estatística desses processos radiativos na atmosfera e requer a disponibilidade e uso de uma base de dados observados por satélites e/ou em estações de coleta de dados operando em superfície conforme descritas no capítulo 4. Este capítulo abordará o processo de modelagem numérica com ênfase no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR que foi adotado para elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar⁵², porém os conceitos básicos demonstrados por intermédio desse exemplo aplicam-se à maioria dos outros modelos existentes.

5.1 DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

A determinação da irradiação solar incidente no topo da atmosfera (TOA) é a primeira etapa para estimar numericamente a incidência de radiação solar na superfície da Terra. A modelagem da irradiação solar no TOA está baseada apenas na avaliação dos fatores astronômicos já mencionados no capítulo 2. As relações matemáticas para cálculo da irradiação solar no TOA são bastante simples e de fácil implementação tanto em planilhas de cálculo quanto em algoritmos numéricos elaborados em linguagens de programação como Fortran, Java, Python entre outras. As equações 5.1 e 5.2 permitem determinar o total diário (H_0) e total horário (I_0) da irradiação solar no topo da atmosfera em $[Jm^{-2}hora^{-1})]$. Esses valores são o ponto de partida para os modelos numéricos que simulam os processos radiativos que ocorrem na atmosfera e modulam a incidência de radiação solar na superfície.

⁵² PEREIRA et al., 2017.

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \left(\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\phi) \sin(\delta) \right) \quad (5.1)$$

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \left(\cos(\phi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin(\phi) \sin(\delta) \right) \quad (5.2)$$

onde $\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta))$ é o ângulo horário no por do Sol e ω_i é o ângulo horário na i -ésima hora. É necessário atenção às unidades dos ângulos quando se trabalha com planilhas de cálculo e compiladores de linguagens de programação. Em geral, os ângulos devem estar descritos em radianos e o uso da unidade incorretamente causa erros significativos. Os fatores $(24 \times 3600 / \pi)$ e $(12 \times 3600 / \pi)$ aparecem nas expressões para adequação das unidades.

5.2 MODELAGEM DA IRRADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE

Basicamente, existem dois métodos para modelagem numérica da irradiação solar incidente na superfície: (i) a utilização de uma rede de radiômetros distribuídos estrategicamente sobre a região de interesse em conjunto com a aplicação de técnicas de interpolação das medidas de radiação realizadas; e (ii) o uso de modelos computacionais para determinação de estimativas da radiação solar incidente por meio de relações empíricas ou da solução da equação de transferência radiativa na atmosfera.

O principal fator de modulação da radiação solar na superfície é a cobertura de nuvens^{53,54,55} que apresenta uma distribuição espacial muito variável, mesmo em distâncias pequenas de algumas dezenas de quilômetros. Estudos recentes mostram que as estimativas de radia-

⁵³ STUHLMANN, 1990.

⁵⁴ PINKER; LASZLO, 1989.

⁵⁵ GAUTIER et al., 1980.

ção solar obtidas por meio de modelos computacionais que utilizam dados de satélite podem ter incertezas menores do que os obtidos pela interpolação de valores medidos por sensores instalados em uma rede de estações solarimétricas. Perez et al.⁵⁶ mostraram que é necessário distâncias inferiores a 35km entre as estações solarimétricas para que as estimativas horárias de irradiação solar, obtidas por interpolação, apresentem uma precisão similar às obtidas utilizando modelos satelitais. Um estudo⁵⁷ realizado com dados observados em estações meteorológicas automáticas em operação no Sudeste Brasileiro produziu resultados similares. No caso das estimativas diárias, os autores apontam que as distâncias entre as estações de medida precisam ser inferiores a 45 km para que as estimativas obtidas pela interpolação apresentem incertezas equivalentes às dos modelos. A Figura 5.1 mostra o mapa de localização das estações utilizadas no estudo e a comparação dos desvios encontrados nas estimativas produzidas com cada uma das metodologias. Os resultados demonstram que a adoção de modelos computacionais alimentados por dados de satélites é, certamente, a melhor alternativa para o mapeamento da disponibilidade de energia solar em áreas de grandes dimensões em razão do elevado custo de instalação e operação de uma rede de coleta de dados radiométricos com especificações técnicas estabelecidas para o setor energético.

Diversos modelos computacionais foram desenvolvidos para a obtenção de estimativas de radiação solar incidente na superfície a partir de dados de satélite^{58,59,60,61,62,63,64,65}. Esses modelos podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas relacionando medidas de irradiação solar incidente e variáveis meteorológicas locais e, portanto, apresentam validade restrita à

⁵⁶ PEREZ, R., SEALS, R.; ZELENIKA, A., 1997.

⁵⁷ MARTINS; PEREIRA, 2011.

⁵⁸ STUHLMANN, 1990.

⁵⁹ DIEKMANN et al., 1986.

⁶⁰ PINKER; EWING, 1985.

⁶¹ GAUTIER et al., 1980.

⁶² TARPLEY, 1979.

⁶³ KERSCHGENS et al., 1978.

⁶⁴ HAY; HANSON, 1978.

⁶⁵ RASCHKE, 1972.

região estudada. O desempenho dos modelos estatísticos também está fortemente associado às variáveis escolhidas (ou disponíveis) para o seu desenvolvimento de modo que, em geral, as incertezas nas estimativas serão menores quanto maior a correlação estatística entre as variáveis utilizadas e a irradiação solar incidente na superfície. Os modelos estatísticos também podem ser utilizados para estimar a irradiação solar direta e difusa uma vez que os custo de instalação e operação de equipamentos específicos para essas variáveis é mais elevado do que os piranômetros utilizados para a irradiação global.

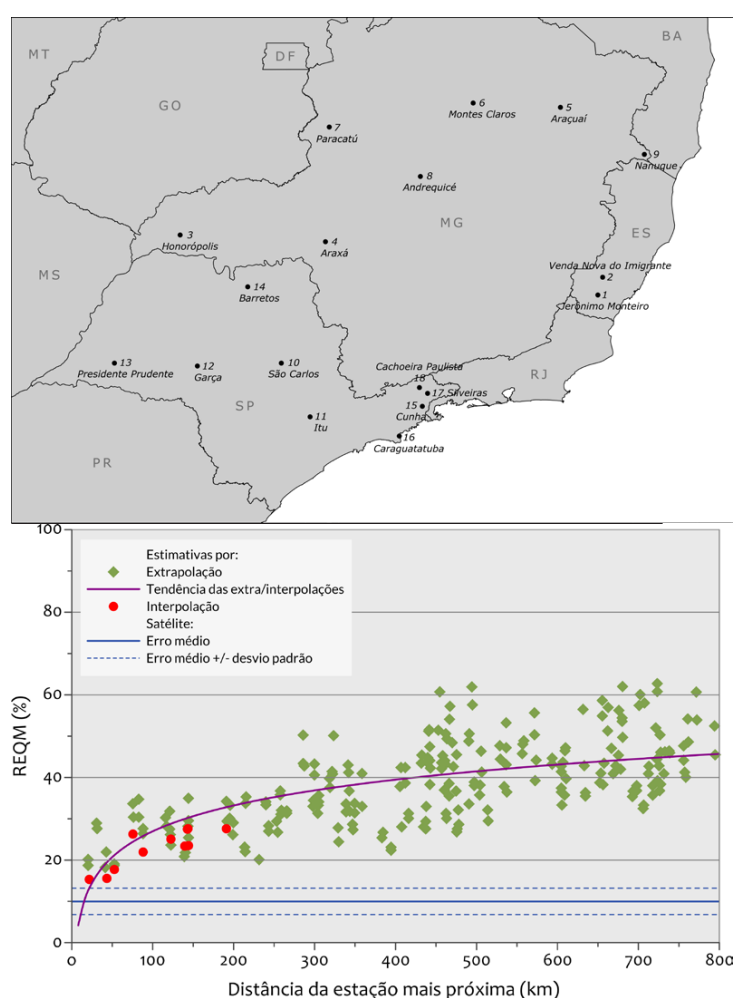


FIGURA 5.1. (A) MAPA COM LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS OPERANDO NO SUDESTE BRASILEIRO UTILIZADAS PARA ESTUDO COMPARATIVO DE INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE NA SUPERFÍCIE; (B) GRÁFICO APRESENTANDO OS DESVIOS DAS ESTIMATIVAS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E O LOCAL DE INTERESSE
FONTE: Martins e Pereira (2011).

Os modelos físicos são válidos para qualquer região do planeta uma vez solucionam a equação de transferência radiativa por meio de parametrização dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera. Várias técnicas foram desenvolvidas para solucionar a equação de transferência radiativa de forma precisa. Dentre eles, pode-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos, ordenadas discretas, ordens sucessivas de espalhamento, Monte Carlo e diferenças finitas^{66,67}. Essas técnicas necessitam de tempo e capacidade computacional elevados para obtenção de estimativas da irradiância solar, principalmente em condições de céu com nuvens de elevada espessura ótica, característica que tornam seu uso pouco prático. Como alternativa a essas técnicas precisas, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor com o objetivo de utilização operacional e rotineira na determinação de estimativas confiáveis de irradiação solar. Dentre os métodos aproximados, pode-se destacar aproximação de Eddington e o método de Dois Fluxos (“two-stream”) bastante utilizados atualmente pela comunidade acadêmica^{35, 68}.

A parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos depende do conhecimento de parâmetros atmosféricos como a cobertura de nuvens e o perfil vertical da concentração dos constituintes atmosféricos como aerossóis, vapor d’água, ozônio e demais gases atmosféricos. A disponibilidade de informações precisas sobre as propriedades atmosféricas e seus constituintes é requisito fundamental para obtenção de estimativas com incertezas adequadas para atender às demandas do setor energético. O sensoriamento remoto da atmosfera é a opção para coleta de dados a serem utilizados para alimentar os modelos. O uso de satélites artificiais vem crescendo de importância em função da abrangência de cobertura espacial e da disponibilidade de dados. Existem vários tipos de satélite em órbita ao redor da Terra; cada um apresentando vantagens e desvantagens decorrentes das especificidades de suas características técnicas. A classificação empregada mais comumente

⁶⁶ LENOBLE, 1985.

⁶⁷ DAVE; CANOSA, 1974.

⁶⁸ MARTINS, 2011.

define satélites em polares e geoestacionários (vide Figura 5.2). Os satélites “polares” ou de “órbita polar” estão em órbita baixa (aproximadamente 800km) e circulam em torno do planeta, rastreando a superfície da Terra de um polo a outro. Os períodos de suas órbitas são de algumas horas. Esse tipo de órbita é heliossíncrona, ou seja, o satélite transita numa órbita que permanece sempre no mesmo plano, enquanto a Terra gira a razão de 15° por hora.

Os satélites geoestacionários estão posicionados sobre a linha do Equador a uma altura de aproximadamente 36000 km acima da superfície da Terra. Eles giram ao redor do planeta à mesma velocidade como que a Terra gira ao redor de seu eixo, assim o satélite permanece estacionário sobre um ponto na Terra e pode observar uma região circular com extensão aproximada de até 70° de latitude. Porém, na prática, os dados dos satélites geoestacionários empregados em análises quantitativas restringem-se a uma área limitada por um círculo com raio de até 55° de latitude, com o centro no ponto subsatélite (o ponto projetado na superfície da Terra, imediatamente abaixo do satélite artificial). Esses satélites são muito úteis porque observam continuamente uma grande área a partir do mesmo ponto, condição ideal para uso em serviços de comunicação, meteorologia e para imageamento remoto uma vez que podem esquadriñar os mesmos pontos na Terra repetidamente com frequência superior aos satélites orbitais. Em geral, satélites geoestacionários são capazes de fornecer imagens em uma resolução temporal de meia hora permitindo observar o movimento de nuvens e sistemas meteorológicos com grande confiabilidade. A abertura do ângulo de visada dos seus sensores é, em geral, muito pequena com o intuito de observar áreas de poucos quilômetros de extensão em cada pixel da imagem produzida pelo satélite. Esses satélites dispõem de sensores para coleta de dados em vários comprimentos de onda (“canais”), permitindo a aquisição de dados de diferentes características da atmosfera e da superfície da Terra.

Os dados coletados por satélites geoestacionários apresentam-se como mais adequados para alimentar modelos computacionais para a estimativa da irradiação solar em razão das características mencionadas acima: observação do sistema Terra/Atmosfera sempre a partir da mesma

posição com uma frequência e uma resolução horizontal suficientemente elevadas para observação dos fenômenos mais relevantes de atenuação da radiação solar. Os modelos computacionais em uso no Brasil, e que serão discutidos mais adiante, utilizam a base de dados coletados pelos satélites da série GOES operados pela NOAA. Atualmente, o GOES-16 está em operação produzindo imagens com frequência de 15-30 minutos com uso de sensores operando em 16 canais espectrais distintos com resolução espacial da ordem de 0,5-2,0 km⁶⁹

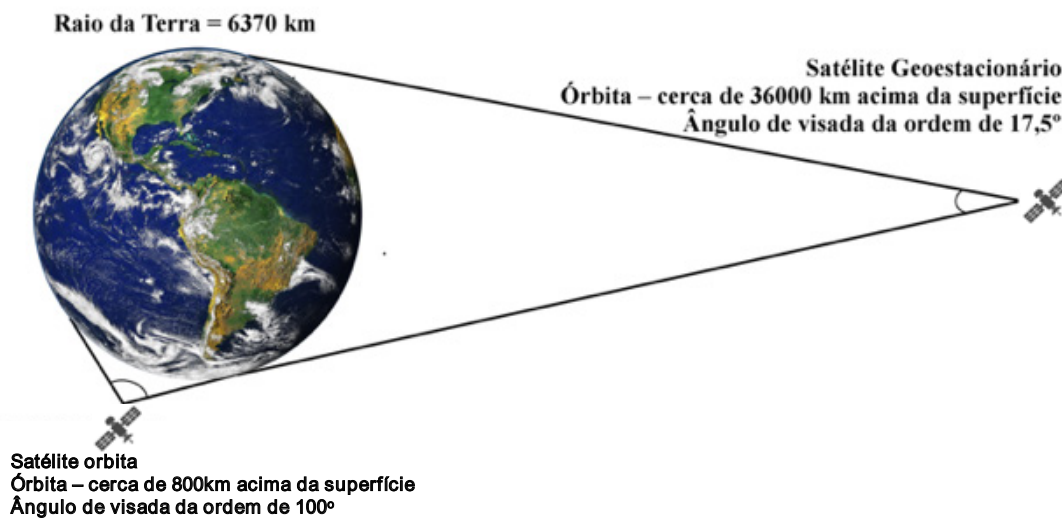


FIGURA 5.2 - ILUSTRAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR E GEOESTACIONÁRIOS.

FONTE: Os autores.

5.3 MODELOS SATELITAIS

Os modelos numéricos físicos que fazem uso de dados coletados por satélites artificiais estão baseados no balanço de energia na atmosfera (equação de transferência radiativa) de forma que a energia incidente no topo da atmosfera ($E_{TOA}^{\downarrow}$) deve ser igual à soma da energia que retorna ao espaço ($E_{TOA}^{\uparrow}$) e a energia que é absorvida na atmosfera (E_{atm}) e na superfície do planeta (E_{sup}).

⁶⁹ SCHMIT et al., 2017.

$$E_{TOA}^{\downarrow} = E_{TOA}^{\uparrow} + E_{atm} + E_{sup} \quad (5.3)$$

Considerando que a energia absorvida na superfície pode ser descrita por $E_{sup}^{\downarrow} (1 - A_s)$, onde $E_{sup}^{\downarrow}$ é a energia incidente na superfície e A_s é o albedo de superfície, podemos reescrever a equação (5.3) como:

$$E_{sup}^{\downarrow} = (E_{TOA}^{\downarrow} - E_{TOA}^{\uparrow} - E_{atm}) / (1 - A_s) \quad (5.4)$$

Desse modo, para conhecer a radiação incidente à superfície ($E_{sup}^{\downarrow}$), é necessário conhecer o albedo da superfície (A_s) e os processos de interação da radiação solar com a atmosfera (E_{atm}) já que a radiação do topo da atmosfera é bem conhecida por meio das equações (5.1) e (5.2). A Figura 5.3 ilustra esquematicamente o princípio básico por trás de todos os modelos satelitais.

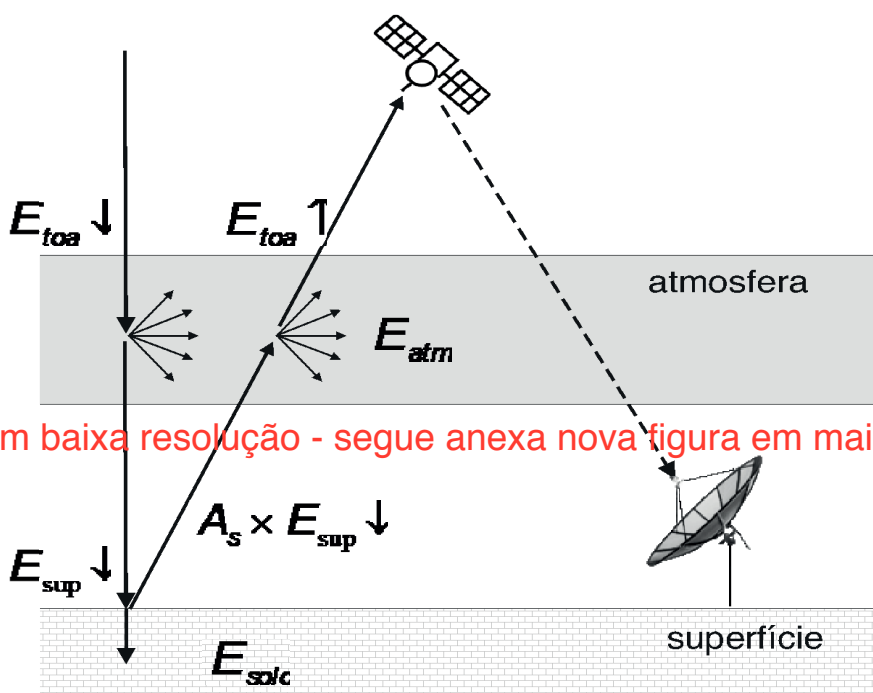


Figura ficou com baixa resolução - segue anexa nova figura em mais alta resolução

FIGURA 5.3 - ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO BÁSICO QUE NORTEIA OS MODELOS SATELITAIS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

FONTE: Os autores.

Para cálculo do termo (E_{atm}) do lado direito da Equação (5.4), é necessário simular os processos físicos que ocorrem na atmosfera. A representação matemática desses processos físicos é descrita pela equação de transferência radiativa (5.5), a qual descreve o fluxo de energia em um volume infinitesimal da atmosfera. Essa equação baseia-se no princípio de conservação de energia e pode ser facilmente compreendida se considerarmos um elemento de volume da atmosfera descrito por $dA.ds$ em torno do ponto M (vide Figura 5.4) onde dA representa a área do elemento perpendicular à direção s de propagação da radiação; e ds é o comprimento do elemento de volume na direção de propagação.

$$\frac{dL(M,s)}{ds} = -\sigma_{e\lambda}(M)[L_{\lambda}(M,s) - J_{\lambda}(M,s)] \quad (5.5)$$

onde $L(M,s)$ representa a radiância solar, em $W.m^{-2}.sr^{-1}$, no elemento de volume e na direção de propagação s , $\sigma_{e\lambda}(M)$ é o coeficiente de extinção, e $J_{\lambda}(M,s)$ representa o termo fonte representando a soma de duas contribuições: termo fonte de espalhamento, $J_{\lambda sc}(M,s)$, e termo fonte de emissão, $J_{\lambda em}(M,s)$.

O primeiro termo do lado direito da equação (5.5) representa a redução da radiância solar na direção s em razão de processos radiativos de absorção e espalhamento. O segundo termo representa o incremento de radiância na direção s decorrente de processos de espalhamento em outras direções e o incremento devido à emissão radiativa na direção s do sistema Terra/Atmosfera. O detalhamento da equação de transferência radiativa foge ao escopo deste livro e recomenda-se a leitura de Lenoble⁷⁰ para aprofundamento do estudo e compreensão da equação (5.5).

⁷⁰ LENOBLE, 1985.

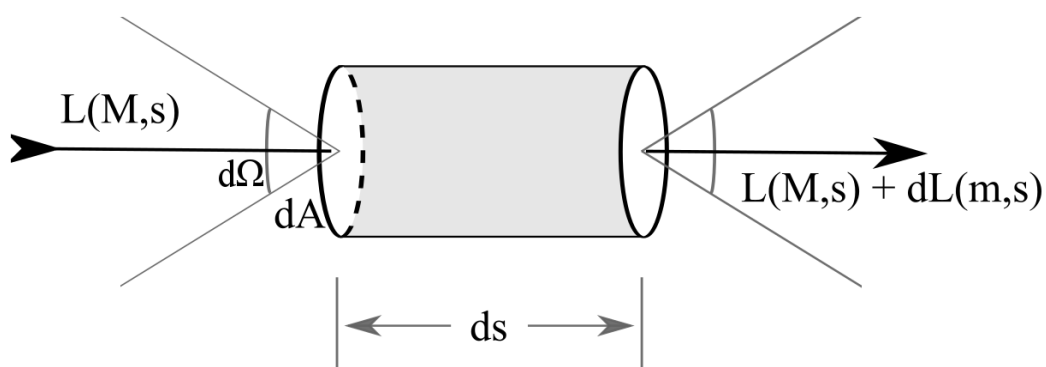


FIGURA 5.4 - ILUSTRAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR E GEOESTACIONÁRIOS

FONTE: Os autores.

Um dos primeiros modelos que utilizou o “Método de Dois Fluxos” para solução aproximada da equação de transferência radiativa na atmosfera foi desenvolvido por Kerschgens et al.⁷¹. A análise comparativa das estimativas obtidas com a solução exata da equação de transferência radiativa determinou discrepâncias da ordem de 3% tanto para fluxos ascendentes quanto para fluxos descendentes de radiação solar. Os parâmetros de entrada desse modelo são os coeficientes de absorção e espalhamento de diversos constituintes atmosféricos – O_2 , O_3 , CO_2 , H_2O e aerossóis – com grande detalhamento espectral.

Dois modelos físicos estão em constante desenvolvimento ao longo das últimas décadas para uso em avaliação da incidência de radiação solar no território Brasileiro^{72,73}: o modelo GL e o modelo BRASIL-SR. O Modelo GL é um modelo físico desenvolvido inicialmente na Universidade Federal da Paraíba com uso de imagens obtidos no espectro visível pelo satélite METEOSAT 4. Posteriormente, o modelo foi adaptado por pesquisadores do INPE para uso de imagens fornecidas pelo satélite GOES. O modelo é executado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do INPE (CPTEC/INPE) e as estimativas de irradiação solar global são disponibilizadas diariamente

⁷¹ KERSCHGENS et al., 1978.

⁷² PORFÍRIO; CEBALLOS, 2014.

⁷³ MARTINS, 2001.

em <<http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp#>>. Recomendamos a leitura de Porfírio e Ceballos⁷⁴ para aprofundamento na metodologia adotada para desenvolvimento do modelo GL.

Esse documento descreverá o esquema principal do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR adotado para a elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar⁷⁵. Outros modelos numéricos, desenvolvidos pela comunidade científica internacional, podem fornecer estimativas para o território brasileiro, porém não foram desenvolvidos considerando a climatologia típica no território brasileiro, e vários deles constituem códigos fechados e comerciais. O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) possibilitou a realização de estudos de intercomparação do desempenho de diferentes modelos^{76,77} para o Brasil.

5.4 MODELO BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de dados de cobertura de nuvens obtida por análise estatística de imagens de satélite em conjunto com valores climatológicos de variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa, albedo de superfície, visibilidade atmosférica). O modelo foi inicialmente desenvolvido na Alemanha a partir do código IGMK⁷⁸ e, posteriormente, adaptado e aperfeiçoado no Brasil por meio de convênio estabelecido entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A estimativa da irradiação solar incidente na superfície é realizada em três etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e

⁷⁴ PORFÍRIO; CEBALLOS, 2014.

⁷⁵ PEREIRA et al., 2017.

⁷⁶ RENNÉ et al., 2005.

⁷⁷ BEYER et al., 2010.

⁷⁸ STHULMANN et al., 1990.

de imagens de satélite; b) aplicação do método de “Dois-Fluxos”; e c) cálculo da irradiação solar na superfície.

A Figura 5.5(a) apresenta o diagrama em blocos dos processos executados na primeira etapa do código BRASIL-SR. O banco de dados de temperatura e umidade relativa foi elaborado com uso de observações em estações meteorológicas distribuídas pelo território brasileiro e operadas pelo Inmet ao longo dos últimos 30 anos. Os valores de albedo de superfície são produtos do DAAC-Langley e os dados de altitude foram obtidos da base de dados GTOPO produzido pelo EROS Data Center com resolução horizontal de 30” de arco.

A hipótese básica adotada no desenvolvimento do modelo BRASIL-SR reside na aproximação de uma relação numérica linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação solar refletida no topo da atmosfera. Dessa forma, pode-se demonstrar que a irradiância solar global incidente na superfície terrestre (G) está linearmente distribuída entre as duas condições atmosféricas extremas – céu claro (sem nuvens) e céu totalmente encoberto por nuvens – conforme descrito na equação (5.6):

$$G = G_0 \left\{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \right\} \quad (5.6)$$

onde G_0 é a irradiância solar global incidente no topo da atmosfera; τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro (totalmente sem nuvens) e de céu completamente nublado, respectivamente.

A Figura 5.5(b) apresenta o fluxograma dos procedimentos principais executados no modelo BRASIL-SR para estimar numericamente as duas transmitâncias, τ_{clear} e τ_{cloud} , a partir da solução da equação de transferência radiativa em 135 intervalos espectrais utilizando o método de “Dois-Fluxos”. Os processos radiativos parametrizados são: nuvens, espalhamento *Rayleigh* devido aos gases atmosféricos, absorção por gases atmosféricos (O_3 , CO_2 e vapor d’água), e espalhamento Mie devido aos aerossóis. Os cálculos são realizados para uma atmosfera dividida em 30 camadas verticais assumindo que a concentração de cada constituinte atmosférico

estabelecida com base na atmosfera-padrão definida a partir do valor da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). As parcelas da irradiação difusa e irradiação direta são estimadas considerando o efeito das múltiplas reflexões entre as diversas camadas atmosféricas e que o albedo de superfície (A_s) é idêntico para a radiação difusa e radiação direta. Para a estimativa de τ_{cloud} , a parametrização da microfísica de nuvens é estabelecida considerando um único tipo de nuvens selecionado pelo usuário e assume que as nuvens atenuam totalmente a irradiação direta proveniente do Sol. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada, assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotropicamente distribuído.

A natureza estocástica do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo por meio do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens (C_{eff}) presente na equação (5.6). O coeficiente C_{eff} está associado à profundidade ótica das nuvens em cada elemento de imagem do satélite GOES (pixel). Os valores de C_{eff} são determinados a partir da composição de imagens de céu claro e de céu completamente encoberto produzidas por análise estatística de imagens do satélite GOES na primeira etapa descrita na Figura 5.5(a). O tratamento de imagens de satélite da série GOES inclui o recebimento, a qualificação e o gerenciamento de um banco de imagens fornecidas pela Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais DSA/CPTEC/INPE. A Figura 5.6 (a,b) apresenta imagens obtidas pelos sensores a bordo do satélite GOES 13 nos espectros de radiação visível e infravermelho próximo. Os dados digitais armazenados nestas imagens são utilizados para calcular os valores do coeficiente de cobertura de nuvens, C_{eff} .

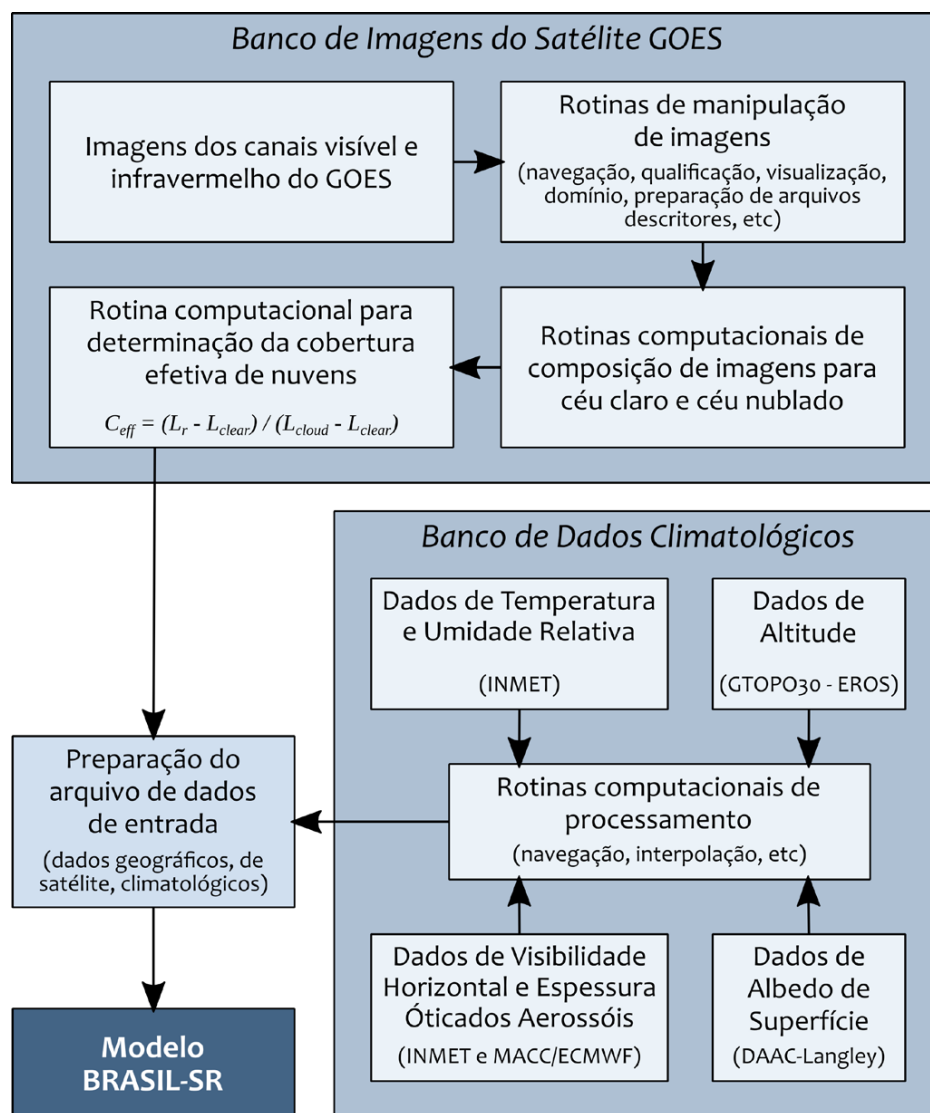


FIGURA 5.5(a) - FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS PARA MANIPULAÇÃO E PROCESSAMENTO DA BASE DE DADOS DE ENTRADA DO MODELO BRASIL-SR.

FONTE: Os autores.

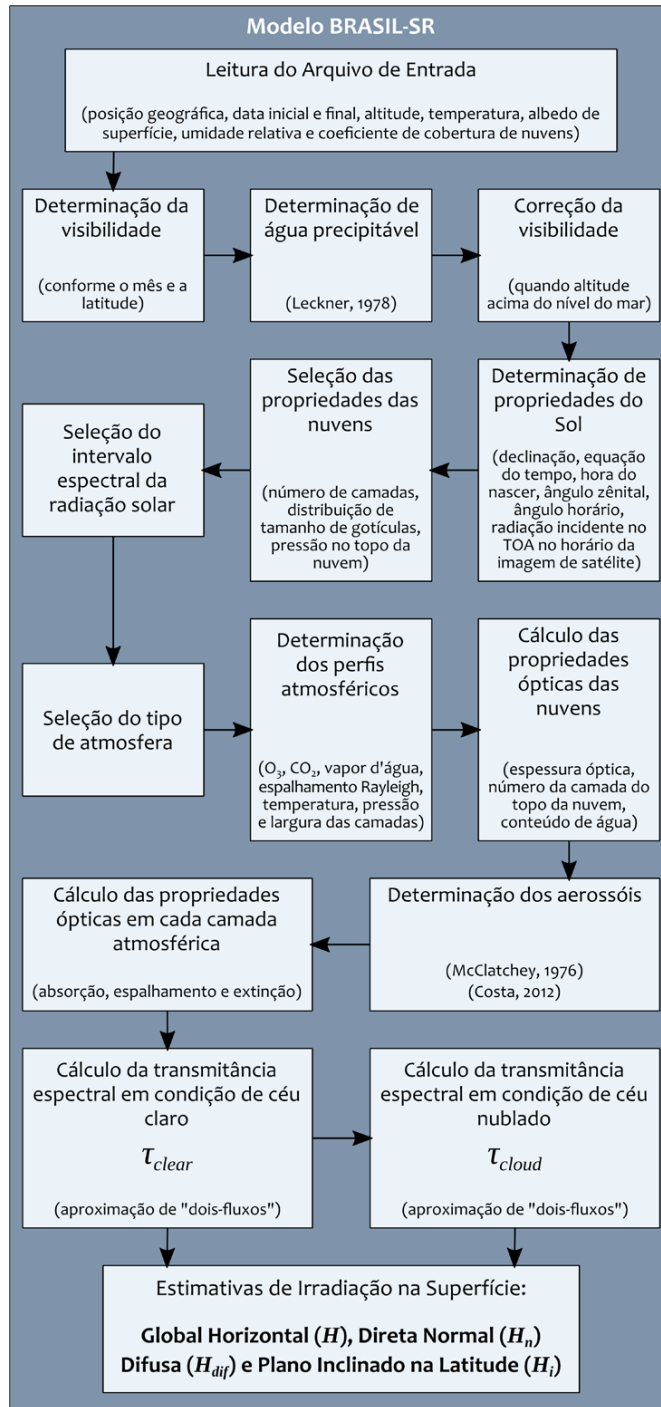
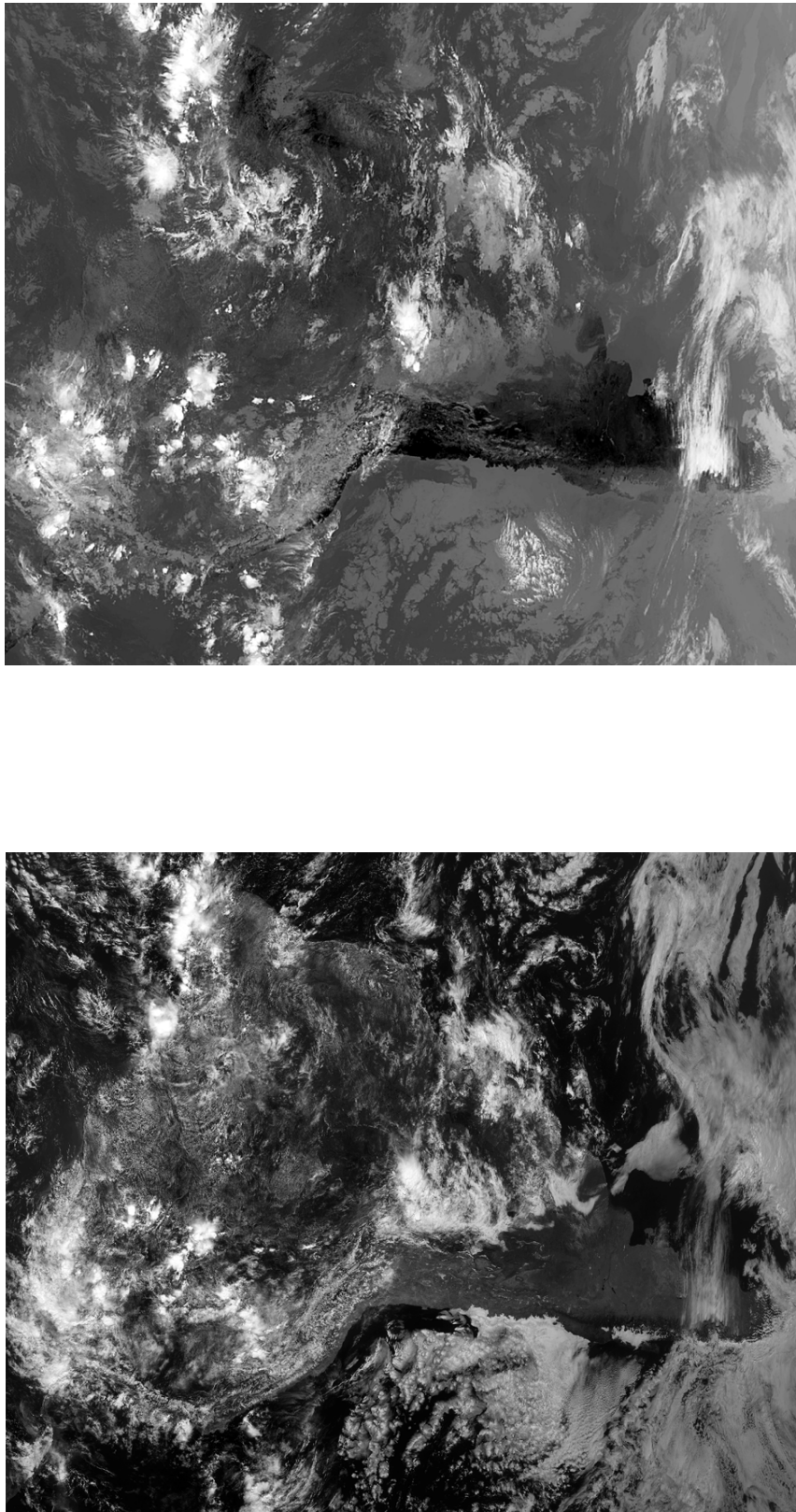


FIGURA 5.5 (b) FLUXOGRAMA DESCRITIVO DA MODELAGEM NUMÉRICA ADOTADA PARA A SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA RADIA-TIVA EM CONDIÇÕES DE CEÚ CLARO E TOTALMENTE ENCOBERTO. A ESTIMATIVA DE IRRADIÂNCIA SOLAR PARA QUALQUER CONDIÇÃO DE NEBULOSIDADE É REALIZADA COM A COBERTURA EFETIVA DE NUVENS OBTIDA A PARTIR DA ANÁLISE DE IMAGENS DO SATÉLITE GOES.

FONTE: Os autores.



(a)

(b)

FIGURA 5.5 - EXEMPLO DE IMAGENS FORNECIDAS PELO SATÉLITE GEOESTACIONÁRIO GOES-13 PARA A AMÉRICA DO SUL UTILIZADAS NA ELABORAÇÃO DA 2ª EDIÇÃO DO ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR: (a) IMAGEM OBTIDA NO ESPECTRO VISÍVEL (CANAL 1) (b) IMAGEM OBTIDA NA FAIXA ESPECTRAL DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (CANAL 4)

FONTE: INPE (2017).

5.5 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS PRODUZIDAS POR MODELAGEM NUMÉRICA

É importante compreender que desenvolver e executar um modelo numérico para obtenção de estimativas de irradiância (ou irradiação) solar incidente na superfície não é suficiente. É necessário conhecer as incertezas das estimativas fornecidas pelo modelo e compreender em que condições o modelo apresenta um desempenho que atende os requisitos de confiabilidade estabelecidos para o setor de energia.

A confiabilidade das estimativas de irradiação solar na superfície fornecidas por modelos numéricos deve ser avaliada por meio de comparação com dados medidos em estações solarimétricas de superfície. A validação dos modelos é realizada utilizando índices estatísticos que possibilitam quantificar os desvios apresentados pelas estimativas em relação aos valores observados na superfície. Deve-se ressaltar a importância dos aspectos de controle de qualidade na aquisição de dados de campo discutidos no Capítulo 4. A escassez de dados de campo com incertezas pequenas inviabilizam uma avaliação adequada do desempenho de modelos numéricos e inviabilizam o aprimoramento das parametrizações utilizadas para a simulação dos processos físicos que ocorrem na atmosfera para atenuação da radiação solar. Em resumo, a validação dos modelos numéricos tem por objetivo:

- conhecer as incertezas para as estimativas de irradiação solar fornecidas pelos modelos numéricos;
- identificar as condições em que o modelo apresenta deficiências para simular os processos de interação da radiação solar com os constituintes atmosféricos;
- promover o aprimoramento da modelagem numérica com uso de novas metodologias.

As duas métricas estatísticas mais comumente utilizadas para validação das estimativas de modelos de transferência radiativa são

o viés médio ou desvio sistemático médio (MBE – do inglês “Mean Bias Error”) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE – do inglês “Root Mean Square Error”) descritos conforme as equações (5.7) e (5.8):

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Est_i - Obs_i) \quad (5.7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Est_i - Obs_i)^2} \quad (5.8)$$

onde o índice i refere-se a cada par de valores fornecidos pelo modelo (Est_i) e observados em superfície (Obs_i), e N representa o número total de pares utilizados no processo de validação. A unidade de medida dos desvios MBE e RMSE é a mesma da grandeza validada de modo que, se valores estimados e observados de irradiância solar global estão sendo comparados, o MBE e o RMSE serão apresentados em *Watts* por metro quadrado ($W.m^{-2}$). Em muitas situações, esses desvios são apresentados como valores percentuais do valor médio da grandeza observada, bastando para isso realizar a divisão das equações (5.6) e (5.7) pela média dos N valores observados na estação de coleta de dados de superfície.

É importante ter claro o significado físico dos desvios MBE e RMSE com o intuito de compreender o desempenho do modelo numérico utilizado. O valor do desvio MBE caracteriza o balanço entre subestimativa (modelo estima valores menores que as observações) e superestimativa (modelo estima valores maiores que as observações). A subestimativa é indicada por valores negativos de MBE e valores positivos são indicativos de ocorrência de superestimativa dos valores observados.

O valor do desvio RMSE está diretamente relacionado à dispersão dos desvios entre valores estimados e observados. Note que os valores de RMSE não indicam superestimativas ou subestimativas, no entanto um aumento do valor absoluto de MBE implica valores maiores de RMSE. É preciso ressaltar que o valor de RMSE é diferente

do valor de desvio padrão dos desvios entre valores estimados e observados. O desvio padrão indica apenas a componente aleatória da dispersão uma vez que está associada à distribuição dos valores dos desvios encontrados em torno do valor do desvio MBE.

Além dos desvios MBE e RMSE, o coeficiente de determinação R^2 entre estimativas e observações também é frequentemente utilizado nos procedimentos de validação de modelos computacionais. O valor de R^2 representa a capacidade do modelo em simular as tendências apresentadas nos valores observados em campo. A equação (5.9) descreve matematicamente o coeficiente de determinação de modo que podemos interpretá-lo como uma comparação entre a variância dos desvios e a variância dos valores observados. O valor de $R^2 = 1$ representa a condição ideal em que não há variância entre valores estimados e observados.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2 (Est - Obs)}{\sigma^2 (Obs)} \quad (5.9)$$

onde $\sigma^2 (Est - Obs)$ representa a variância encontrada para os desvios entre valores estimados e observados e $\sigma^2 (Obs)$ representa a variância dos valores observados na estação de coleta de dados de campo.

Outra métrica utilizada nas análises de validação de estimativas fornecidas por modelos numéricos é a verificação da habilidade em reproduzir a distribuição de probabilidade dos valores de observados pelos sensores em estações de campo. O teste de Kolmogorov–Smirnov, descrito pela equação (5.10), é utilizado com esse intuito e avalia a diferença absoluta entre as distribuições de frequência cumulativa das estimativas (valores modelados) e observações (valores medidos em campo). A expressão apresentada em (5.10) produz o valor de KSI normalizado pelo valor crítico de Kolmogorov–Smirnov (V_c) que depende do número de amostras de dados disponíveis. O modelo numérico utilizado consegue representar a distribuição de frequência

dos valores observados quando os valores de KSI estiverem próximos da unidade ($KSI = 1$).

$$KSI = \frac{\int_0^{G_{max}} |P(G)_{model} - P(G)_{obs}|}{V_C} \quad (5.10)$$

onde $P(G)_{model}$ e $P(G)_{obs}$ representam as probabilidades cumulativas para o valor G da variável em estudo na distribuição de frequências das estimativas produzidas pelo modelo e das observações em campo.

Embora outras métricas possam estar descritas na literatura, esses quatro índices estatísticos são os mais frequentemente utilizados e permitem avaliar a ocorrência de erros sistemáticos que determinam uma superestimativa ou subestimativa da irradiação solar incidente na superfície (seja global, difusa ou direta), a dispersão dos desvios em torno de seu valor do erro médio e a capacidade do modelo em reproduzir as tendências e a distribuição de frequência observadas nos dados coletado na superfície. Deve-se ter em mente que modelos numéricos constituem ferramenta importante no levantamento dos recursos solares, porém não substituem as medidas em campo. Como foi visto, as saídas dos modelos dependem criticamente da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada. Por exemplo, modelos que empregam dados satelitais ficam limitados à frequência com que tais dados são coletados e fornecidos. As imagens do satélite GOES para a América do Sul são normalmente fornecidas com resolução temporal de 15-30 minutos. Os campos de nuvens geralmente mudam bastante em intervalos de tempo dessa ordem de grandeza, o que resulta em uma incerteza das estimativas fornecidas pelos modelos numéricos que empregam tais imagens. Além disso, nem todas as variáveis atmosféricas necessárias para a parametrização da equação de transferência radiativa estão disponíveis com a resolução espacial e temporal compatível com a frequência das imagens de satélite. A escassez de dados meteorológicos de qualidade também contribui para limitar a exatidão das estimativas de irradiação solar na superfície.

O uso de técnicas estatísticas para pós-processamento e refinamento das saídas dos modelos numéricos pode contribuir para a redução das incertezas da modelagem numérica, mas também dependem da disponibilidade de uma base de dados em superfície, e, por essa razão, nem sempre são possíveis de serem empregadas. Tipicamente, os desvios sistemáticos relativos (rMBE) de modelos numéricos satelitais bem implementados e operados, com uso de pós-processamento, podem chegar próximo a zero, porém os desvios quadráticos médios relativos (rRMSE) encontrados na literatura estão acima de 8-9%. O Quadro 5.1 apresenta os índices estatísticos obtidos no processo de validação do modelo BRASIL-SR. A Figura 5.7(a) ilustra a comparação entre valores observados em estação de coleta de dados em superfície e valores estimados para a irradiação solar direta. A Figura 5.7(b) mostra a boa concordância entre a distribuição de valores estimados de irradiância solar e os valores medidos indicando que o modelo computacional, além de apresentar desvios sistemáticos (MBE) e de dispersão (RMSE) pequenos, é capaz de representar muito bem a distribuição de estatística valores de estimativas. Em suma, os desvios estatísticos e incertezas nas estimativas produzidas por modelagem numérica podem diminuir com o crescimento da disponibilidade de dados atmosféricos e com as maiores frequências de amostragem dos satélites ambientais modernos.

R²	MBE (Wh/m²)	rMBE (%)	RMSE (Wh/m²)	rRMSE (%)	Irradiação Média Observada (Wh/m²)
0,82	4	0,1	416	8,4	4951

QUADRO 5.1 INDICES ESTATÍSTICOS OBTIDOS NA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE FORNECIDAS PELO MODELO BRASIL-SR POR COMPARAÇÃO COM DADOS OBSERVADOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS EM OPERAÇÃO NO SUDESTE DO BRASIL

FONTE: Os autores.

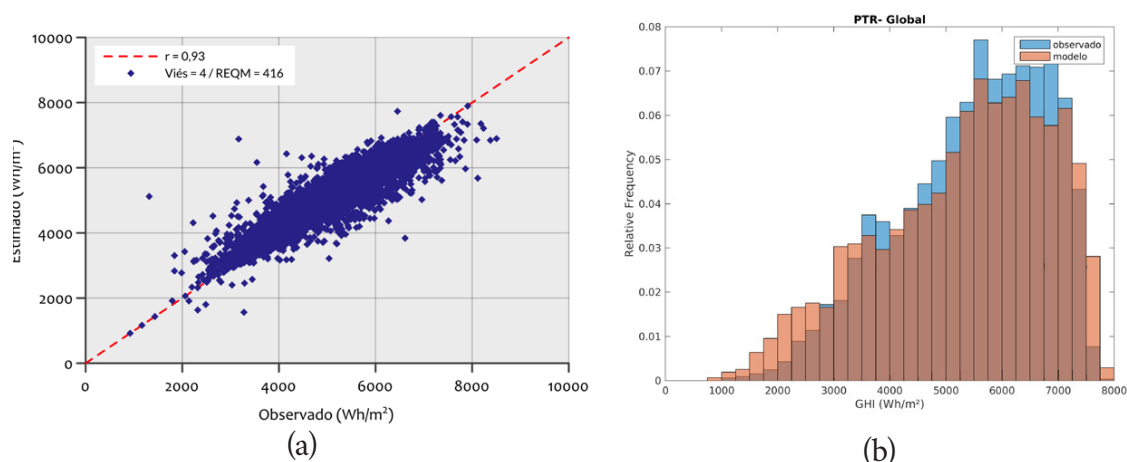


FIGURA 5.7 - COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA INCIDENTE NA SUPERFÍCIE OBSERVADA EM ESTAÇÕES DE COLETA DE DADOS RADIOMÉTRICOS E ESTIMADA COM USO DO MODELO BRASIL-SR. AS BARRAS MAIS ESCURAS NO HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DENOTAM A SOBREPOSIÇÃO DA FREQUÊNCIA ESTIMADA PELO MODELO E OBSERVADA NAS ESTAÇÕES SOLARIMÉTRICAS DE SUPERFÍCIE

FONTE: Os autores.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; ALMEIDA, A. P.; COLLE, S. Determinação de um Fator de Correção para a Radiação Solar Difusa Medida com Anel de Sombreamento. In: COBEM/99 - XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Aguas de Lindóia - SP. *Anais...*

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Nota Técnica 603/2016-SCG/ANEEL* – Audiência Pública no 002/2016, referente à emissão de Resolução Normativa com objetivo de aprimorar os requisitos de medição de irradiância solar necessários à emissão de outorgas de autorização para implantação e exploração de centrais geradoras fotovoltaicas, de que trata a Resolução Normativa no 676, de 25 de agosto de 2015. Brasília, 2016.

ARI, G. K.; BAGHZOUZ, Y. Impact of high PV penetration on voltage regulation in electrical distribution systems. In: International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), jun. 2011, Ischia Porto. *Anais...* EEE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5123*: Relé fotocontrolador intercambiável e tomada para iluminação — Especificação e ensaios. Rio de Janeiro, 2016. p. 40.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5101*: Iluminação Pública — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012. p. 43.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10899*: Energia Solar Fotovoltaica. Rio de Janeiro, 2013. p. 11.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosfera Tempo e Clima*. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BEYER, H. G. et al. Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. In: *Proceedings of EUROSUN 2004*. Freiburg: International Solar Energy Society, 2004.

CERQUEIRA JR, J. G. et al. Estudo da variabilidade da coluna de água precipitável no semiárido brasileiro para calibração de fotômetro solar, *HOLOS*, 30(4), 298-316, 2014.

DEHNE, K. *Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula*, Report n. 15. Geneva: World Meteorological Organization, 1984.

SILVA, P. E. D., MARTINS, F. R.; PEREIRA E. B. Quality Control of Solar Radiation Data within Sonda Network in Brazil: Preliminary results. In: *Proceeding of the EUROSUN 2014*, Aix-les-Bains, France, 2014.

DIEKMANN, F. J.; RASCHKE, E.; WOICK, H. Operational mapping of global radiation over Central Europe. *Meteorol. Rdsch.*, 39, 59-63, 1986.

DIRNBERGER, D. et al. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV Technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 431-442, 2015.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. New Jersey: John Willey & Sons, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Expansão da Geração. Empreendimentos fotovoltaicos: Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica*. Nota técnica EPE-DEE-RE-065/2013-r4. Rio de Janeiro, p. 37, 2017.

ENERGY INTERNATIONAL AGENCY. *International Energy Outlook 2017*. Report #IEO2017. Viena: EIA, 2017.

FOUQUET, R. Book review of: Smil, V. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Praeger, Santa Barbara, CA (2010). *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 1. 198–199. 2011.

GAUTIER, C.; DIAK, G.; MASSE, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 19, 1005-1012, 1980.

GRAAF, M.; TILSTRA, L. G.; STAMMES, P. Global aerosol effect retrieval from passive hyperspectral measurements, *Proc. 'ESA Living Planet*

Symposium 2013', Edinburgh, UK 9–13 September 2013 (ESA SP-722, December 2013).

GUIMARÃES, P. L. O. et al. Avaliação metrológica de um sistema de calibração indoor para piranômetros baseado em um simulador solar. *Revista Brasileira de Energia Solar*, IV-1, p. 17-24. 2015.

HAAG, R.; ARNO, K. Estimativa da distribuição espectral da irradiância solar para distintas regiões da américa do sul. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 11.49-11.56, 2010.

HARRISON, E. F. et al. Radiation budget at the top of atmosphere. In: GURNEY, R. J.; FOSTER, J. L.; Parkinson, C. L. (Ed.) *Atlas Of satellite observations related to global change*. San Diego: Cambridge University Press, 1993.

HAY, J. E.; HANSON, K. J. A satellite-based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE. *Bulletin American Meteorological Society*, 59, 1549, 1978.

HOYER-KLICK, C. et al. MESOR. Management and exploitation of solar resource knowledge. In: *Proceeding of the EUROSUN 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*, Lisbon, Portugal, October 2008. p. 7–10.

HOFF, T. E.; PEREZ, R. Modeling PV fleet output variability. *Solar Energy*, 86, 2177–2189, 2011.

IQBAL, M. *An Introduction to Solar Radiation*, 1. ed. Toronto: Academic Press, 1983.

ISHII, T. et al. Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21, 4, 481-489, 2013.

ISO 9060:1990. *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. International Standards Organization, Genebra, 2003.

ISO 9846:1993. *Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrhe-liometer*. International Standards Organization, Genebra, 1992.

ISO 9847:1992. *Solar energy – Calibration of field pyranometers by com-parison to a reference pyranometer*. International Standards Organization, Genebra, 1992.

KAZANTZIDIS, A. et al. Cloud detection and classification with the use of whole-sky ground-based images. *Atmospheric Research*, 113, 80–88, 2012.

KERSCHGENS, M.; PILZ, U.; RASCHKE, E. A modified two-stream approximation for computations of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere. *Tellus*, 30, 429-435, 1978.

KIPP; ZONEN. *Informações técnicas sobre produtos para aquisição de dados de campo*. Disponível em: <<http://www.kippzonen.com/>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

KLEISSL, J. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2013.

LAVE, M.; RENO, M. J.; BRODERICK, R. J. Characterizing local high-frequency solar variability and its impact to distribution studies. *Solar Energy*, 118, 327–337, 2015.

LENOBLE, J. *Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures*. Virginia: A. Deepak Publishing, 1985.

LI, H. et al. Solar constant values for estimating solar radiation. *Energy*, 36, 1785–1789, 2011.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. *BSRN Global Network Recommended QC Tests*, V2.0. BSRN Technical Report. 2002

LONG, C. N.; SHI, Y. An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *Open Atmos. Sci. J.*, 2, p. 23-27, 2008.

NREL. *Users manual for SERI QC Software - Assessing the Quality of Solar Radiation Data*, Technical Report. Boulder: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1993.

NEVES, Guilherme M. *Influência do Espectro da Radiação Solar em Módulos Fotovoltaicos*. 198f, 2016. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, INPE, São José dos Campos, 2016.

NEVES, G. et al. Influência do espectro solar em módulos fotovoltaicos sob céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado. In: *Anais... VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2018*. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar, 2018.

NOBRE, A. et al. On the impact of haze on the yield of photovoltaic systems in Singapore. *Renewable Energy*, 89, 389-400, 2016.

MCARTHUR, L. J. B. *Baseline Surface Radiation Network - Operations Manual Version 2.1*. Report WCRP-121 WMO/TD-No. 1274. Geneva: World Meteorological Organization, 2005.

MANTELLI NETO, S. L. et al. The use of Euclidean geometric distance on RGB color space for classification of sky and cloud patterns. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 1504-1517, 2010.

MARTINS, F. R. *Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, INPE, São José dos Campos, 2001.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o Sudeste Brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29, 265–276, 2011.

MORIARTY, P.; HONNERY, D. What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 244-252, 2012.

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. *Atlas de climatología solar: América del Sur*, Quito: Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1988.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

PEREZ, R.; SEALS, R.; ZELENKA, A. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. *Solar Energy*, 60, 89–96, 1997.

PEREZ, R. et al. Spatial and Temporal Variability of Solar Energy. *Foundations and Trends in Renewable Energy*, 1, 1–44, 2016.

PINKER, R. T.; EWING, J. A. Modeling Surface Solar Radiation: Model Formulation and Validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24, 389–401, 1985.

PINKER, R. T.; LASZLO I. On the use of climatological information in physical models for the surface insolation from satellites. In: *IRS'88 Current Problems: Proceedings of the International Radiation Symposium*. Lille: Deepak, 302–305, 1989.

PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. Uso do modelo GL na estimativa de radiação solar direta e difusa. In: *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2014, Recife, PE. XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2014.

RASCHKE, E. Multiple scattering calculations of the transfer of solar radiation in an atmosphere-ocean system. *Beitr. Phys. Atm*, 45, 1–19, 1972

RENNÉ, D. et al. Results of Solar Resource Assessments in the UNEP/SWERA Project. In: *Proceedings off ISES 2005 Solar World Congress*, 2005, Goteborg, Sweden. Friburg: International Solar Energy Society, 2005.

SCHMIT, Timothy J. et al. A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 681–698, 2017.

SENGUPTA, M. et al. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*. Technical Report NREL/TP-5D00-63112. Boulder: National Renewable Energy Laboratory, 2015

STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 7, 586-603, 1990.

TARPLEY, J. D. Estimating incident solar radiation at the Earth's surface from geostationary satellite data. *Journal Applied Meteorology*, 18, 1172-1181, 1979.

TIBA, C. *Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres*. Recife: UFPE, 2000.

URQUHART, B. K. E. et al. Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 875–890, doi:10.5194/amt-8-875-2015

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. P. *Processos Radiativos na Atmosfera*. São Paulo: Oficina Textos, 2016

YOUNES, S.; CLAYWELL, R.; MUNEER T. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, 30, 9, 1533-1549, 2005.